

On the Slope Failure Characteristics around Mt. Yasumi
in Kure City.

石井 義明* (Yoshiharu Ishii)

星 健三** (Kenzo Hoshi)

吉国 洋*** (Hiroshi Yoshikuni)

キーワード: まさ土/降雨/浸透/斜面安定/地形 (IGC: E-6)

1. まえがき

呉市には平坦地が少なく、住宅地として利用できる場所が人口に比して少ない。そのため、山腹の急斜面まで宅地化するなど、高度な土地利用が行われている。しかし、これは同時に災害ポテンシャルの極めて高い市民生活を意味し、これまでも、自然斜面の崩壊による大災害を度々経験している。このような災害を防止するには、その実態を把握するとともに、素因・誘因を明らかにし、呉市休山周辺における斜面災害の特性を明らかにしておく必要がある。このため、呉市でまとめた災害特性をもとに多くの研究がなされ、警報や非難命令を出す基準の設定や危険箇所の改修が行われている。しかし、これまでの研究は主として災害と降雨の関係に着目したものが多く、土の強さや地形などの素因も含めた総合的研究は少ない。災害と降雨量との間の統計的情報をもとにした予測は、「その地方または市」と言った比較的広い地域に対しては有効であるが、「この斜面」と言った比較的狭い範囲の災害を予測するには十分でない。

本論文は上述の事を考慮に入れて、呉市における自然斜面の土砂崩壊災害と降雨特性の関係を調べるとともに、地形や斜面表層土の物理的・力学的特性などの素因についても調べ、災害予知に寄与しようとしている。なおここに言う自然斜面は、住宅地周辺の裏山であるため、道路建設や宅地造成などによって何らかの影響を受けていると思われるが、石崖や段々畑などの人工的斜面と区別するため、あえて自然斜面とした。そしてまた、数多くの災害要素を考えることができるが、ここではつぎの点に対象を絞って研究を行った。

(1) 24時間降雨量、最大時間雨量および先行降雨指数と災害発生の関係。

(2) 地盤の起伏、傾斜角、自然含水比、強度および透水特性などの要因の関係。

この研究に用いた主な資料は、呉市の昭和54~56年の災害記録であり、昭和47年および昭和60年の災害記録も補足的に用いた。なお、この研究では上記資料の中の自然斜面の崩壊のみを取上げ、擁壁など人工構造物の崩壊は検討対象から除外した。また、無災害日の降雨記録については、呉測候所の雨量記録を用いた。この研究における調査対象区域として、呉市休山周辺山麓をはじめ、同市天応町から仁方、長浜町までを含め、焼山・郷原地区は災害が少ないため調査対象から除外した。

2. 呉市周辺のまさ土の物理的性質および力学特性

斜面崩壊による災害が「どこに」発生しやすいかを予測するには土の物理的性質や、力学特性を知る必要がある。しかし、不攪乱まさ土の採取や成形が困難なため測定資料は少ない。そこで風化の進行度、一面せん断試験、特別に作成した透水試験機による試験結果など、素因からみた災害予知の可能性について調べた。なお、風化の進行度としては、採取試料の3日水浸時の含水比を用いた。これは風化の進行とともにまさ土が陶土化し、吸

* 呉工業高等専門学校 教授, **同 助教授, *** 広島大学工学部第四類建設構造 教授

水性が増大すると考えられるためである。これについて高橋らは比表面積と吸水量との相関性を調べ、相関係数0.94を得、風化度判定法として一般に用いられている長石比重、強熱減量、pF値などによるより吸水量法がすぐれていると述べている。

斜面崩壊による災害は何ら前兆もなく発生することもあるが、その多くは侵食により、水の集合しやすい地形となっている所に生じ

やすい。そこで今後侵食されやすい場所を推定するため、粒度試験を行い分散率を求めた。分散率は通常の粒度試験から得られる0.05mm以下の土粒子量と、薬品類を用いず得られる0.05mm以下の土粒子量の比で定義され、これと風化指数の関係は図-1のようである。ややばらついてはいるが、風化の進行とともに分散率が增大する傾向がみられる。分散率は15%以下ならば侵食されにくい地盤で、南九州の火山灰シラスは約62%で侵食性の土といわれる。従って呉市周辺山麓斜面のまさ土類は60%以上であるから、侵食されやすい土といえる。

降雨の多少は地中の含水比を増減し、斜面災害発生に大きく影響する。このため斜面表層土の強さが降雨量、或いは含水比とともにどのように変化するかを調べることは災害予知のために非常に重要である。不攪乱まさ土の採取や成形は困難であるため、一面せん断試験用供試体は、圧密試験のトリミングリングを地盤に少しずつ押し込み、切り出しせん断箱にセットした。含水比が小さく、堅い供試体はセットの際に一部が破損する場合もあったが、これを無視して思いきって行った。また含水比の影響をみるため自然含水比のままでせん断するものと、3日間の水浸後にせん断する場合に分けた。

得られた結果は図-2のようである。含水比の増大とともに内部摩擦角は減少し、概ね含水比が10%増大すると、内部摩擦角は約6度減少する傾向がみられる。それぞれ採取場所が異なるにもかかわらず減少の割合が似ていることは、呉市周辺山麓のまさ土の物理的性質にあまり差が無いものと思われる。

まさ土斜面の安定を考える場合、土の強さ、斜面こう配などは大きな要素であるが、透水性も無視できない。これは降雨が斜面に浸透し地表に沿って流下したり、パイピングの発生と関係するからである。

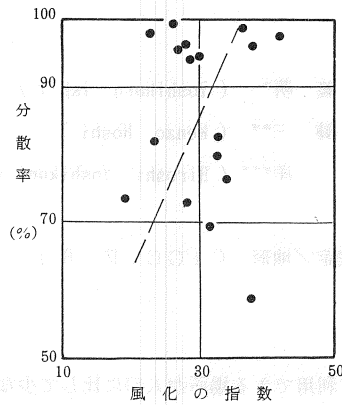


図-1 分散性と風化度

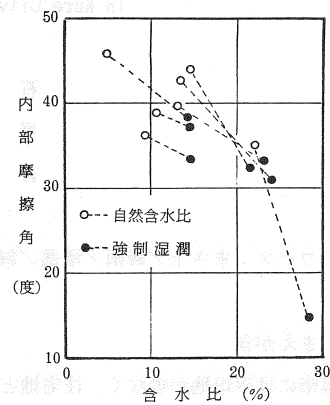


図-2 不攪乱まさ土の含水比の変化にともなう内部摩擦角の変化

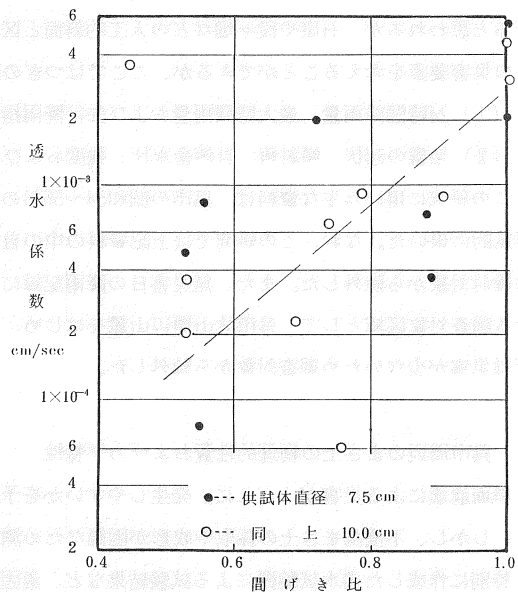


図-3 不攪乱まさ土の透水性係数と間げき比の関係

しかし、不攪乱まさ土の透水試験は供試体の採取・成形が困難だけでなく、供試体と円筒容器間のすき間からの漏水の問題があり、せん断試験以上に難しい。そこで、特別に製作した大型円筒容器に供試体をセットし、容器と供試体の間に10mm程度のすき間を作り、ここに透水性の小さい粘土を填充することにより、漏水量を極力小さくした。この方法の詳細と問題点などについては文献³⁾で発表済みである。

得られた透水係数透kと間げき比eの関係は図-3のようである。一部にばらつきがみられるが、概ねeの増大とともにkも大きくなっており、呉市周辺山麓の自然斜面のkは約 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/sec のオーダーといえる。また、図には供試体の直径が10cm、7.5 cmの2種類を用いた結果を示している。これは大きな供試体の採取・成形が困難な時に、小さい供試体を用い試験する場合の影響をみるために行ったものである。突き固め供試体を用いた場合などは、小さな供試体を用いるほど漏水の影響が大きく、kも大きな値となるが、ここでは7.5 cmのものや、大きなkとなっているが有意な差はない。

3. 斜面崩壊と降雨強度

斜面崩壊に対する降雨の影響は地形や地質により異なるが、表層がまさ土のような砂質で構成されている斜面では、当日雨量が最も大きく影響するとされている。そこで、24時間降雨量の強度別に斜面崩壊の出現変数を求めると表-1のようである。比較的雨量の少ない25~49 mm/day でわずかに発生しているが、100 mm/day以下で50%に達する。過去の災害資料の分析結果によれば、災害発生の限界雨量の下限値は200 mm/dayを目安とする報告⁴⁾もあるが、呉市についてははるかに小さい雨量で発生している。

一方、倉嶋は昭和44~46年の間に各地で発生した斜面崩壊201ヶ所の統計解析を行っている。その中で表-1の出現度数は、斜面崩壊の発生率を示すものでなく、斜面崩壊が発生した時の降雨強度の出現率を示すものであることを強調している。これはそれぞれの降雨強度が同じ回数生じないため重みが異なり、出現度数と発生率を同義に取り扱うことが適当でないことになる。そこで降雨の発生回数も考慮に入れた値が相対発生指数であり、これは表-1の出現度数を24時間雨量の強度別出現率で除したものである。

呉測候所の降雨記録によれば、昭和54~56年の4月~10月までの24時間雨量の強度別出現率は表-2のようである。但し25mm未満のものについては災害の発生数がゼロ件であるため除いた。表は25mm/dayの降雨の出現率が最も高く65.3%であるが、災害の発生が多い75~99mm/dayの降雨出現率は6.1%と意外に少ない。表-1、表-2を用い得られた相対発生指数は表-3のようであり、これを図示すると図-4となる。なお、同図に

表-1 呉市における斜面崩壊と24時間雨量 (昭和54、55、56年)

降雨強度 (mm/day)	災害発生数 (件)	出現度数 (%)
0 ~ 24	0	0
25 ~ 49	4	3.4
50 ~ 74	0	0
75 ~ 99	55	47.0
100 ~ 124	18	15.4
125 ~ 149	0	0
150 ~ 174	40	34.2
175 以上	0	0
計	117	100

表-2 呉市における24時間雨量の強度別出現率 (25mm未満を除く)

降雨強度 (mm/day)	出現率 (%)
25 ~ 49	65.3
50 ~ 74	18.4
75 ~ 99	6.1
100 ~ 124	8.2
125 ~ 149	0
150 ~ 174	2.0

表-3 呉市における24時間降雨別相対発生指数 (25mm未満を除く)

降雨強度 (mm/day)	相対発生指数
25 ~ 49	5.2
50 ~ 74	0
75 ~ 99	770
100 ~ 124	182.9
125 ~ 149	0
150 ~ 174	1710

は先述の倉嶋の解析結果が比較のため挿入されている。この図より、呉市における自然斜面の崩壊は75mm/dayくらいから発生しはじめ、100～124 mm/dayの所で一旦減少しているかに見え、全体として単調に増加せず、きわめて複雑な折線となっている。

図-4に見られるような規則性に乏しい結果が得られたのは、統計量の大小にも関係するであらうが、主として倉嶋の

提案した表示方法にあると考えられる。つまり、倉嶋は降雨強度のランク別に降雨出現率と災害発生日数を考え、両者の間に一意的関係があると仮定して相対発生日数が定義されている。しかし、両者の一意的関係は認め難い。例えば、降雨強度125 mm/dayの降雨があったとしても、斜面崩壊は100mm 降った時点で発生し、その後25mmの降雨があり、全体として125 mm/dayの降雨強度になる場合もある。

このような問題から解放されるためには、降雨強度のランク別に考えるのではなく、ある降雨強度以下の降雨出現率や災害発生日数を考えればよい。それは結果的にランク別の場合の指数を累積したものに等しいので、それぞれ累積降雨出現率および累積災害発生日数と呼び、両者の比（累積災害発生日数／累積降雨出現率）を相対累積発生日数と呼ぶことにする。表-1、および表-2の結果を累積表示に直すと表-4となり、図-5の形となる。なお同図には倉嶋のデータから求めた相対累積発生日数が破線で示されている。そして図-5から呉市における斜面災害の特徴を次のように見出すことができる。

降雨強度が25mm/day以上になると斜面災害の発生する可能性が急速に増大する。そして125 mm/dayに達すると、200 mm/day前後の降雨で発生するであろう斜面災害の70%近くが、この降雨強度で発生する。ついで、125～150 mm/dayの間で斜面崩壊の発生に停滞が見られ、150 mm/dayを越えると再び斜面崩壊が増加し始める。このことは、75～150 mm/dayで発生する斜面崩壊と150 mm/day以上で発生する斜面崩壊には地形、地質その他の要因的差異のあることを予想させる。また、呉市の場合、倉嶋のデータに比較してかなり小さい降雨強度で斜面崩壊が発生し、特異である。この理由は、呉市周辺の自然斜面を覆うまき土の風化が著しいことと、後述するように急峻な地形特性にあると考えられる。

表-4 呉市における斜面崩壊の相対累積発生日数

降雨強度 (mm/day)	累積降雨出現率 (%)	累積災害発生日数	累積災害発生日数	相対累積発生日数
25 ~ 49	65.3	4	3.4	5.2
50 ~ 74	83.7	4	3.4	4.1
75 ~ 99	89.8	59	50.4	56.1
100 ~ 124	98.0	77	65.8	67.1
125 ~ 149	98.0	77	65.8	67.1
150 ~ 174	100.0	117	100.0	100.0

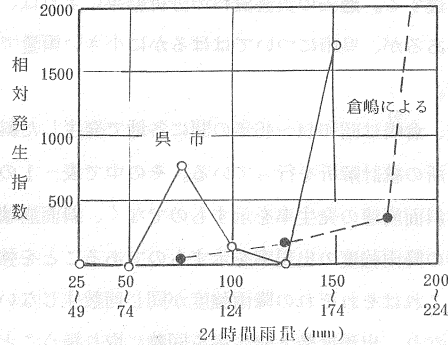


図-4 斜面崩壊の24時間降雨強度別相対発生日数

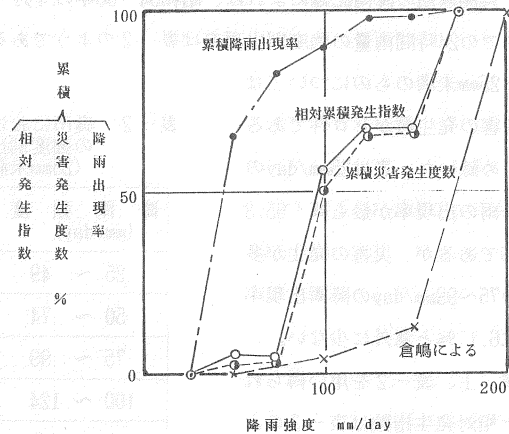


図-5 呉市における斜面崩壊の相対累積発生日数

日雨量とともによく用いられる降雨指数に最大時間雨量がある。これに対する災害の出現度数は表-5である。最大時間雨量が20~29 mm/hrの時の度数が最も大きく55.3%であるが、前述したように、これは発生率を示すものでなく、斜面崩壊が発生した時の降雨強度の出現率を示すものである。従って、出現度数を表-6の最大時間雨量の降雨強度別出現率で除し、相対発生指数を求め図示すると、表-7と図-6のようである。ただし、時間雨量が0~9 mm/hrの時の出現度数がゼロであるため、これを除いた結果である。

降雨強度が30~39 mm/hrではゼロであるため不規則な折線となっているが、40 mm/hr以上では斜面崩壊が急増している。これについても倉嶋のデータと比較すると、概ね類似な傾向にある。また道上らは最大時間雨量の土砂災害の発生限界は50 mm/hrが目安であると述べている。これからすれば図-6の呉市の場合はやゝ小さい最大時間雨量で、多くの斜面崩壊が発生していると言える。

4. 斜面崩壊発生までの時間と降雨量の関係

斜面崩壊の発生予測は生命や財産を保護するうえで大切なことであるが、非常に難しく、その方法はまだ確立されていない。発生場所の予測は多くの素因を点数化する方法が国鉄や建設省で提案、実施されている。が素因と誘因が複雑にからみ合うため特に困難なようである。しかし降雨開始から斜面崩壊の発生までの時間にかぎってみれば、何らかの要因とよい相関性を示すかも知れないので、まず24時間雨量との関係を図-7のように調べた。なお、今までに示した表と、これから示す

図上のプロット数は必ずしも一致しない。これは同一ヶ所に数個が重なり表示しにくいものは、1個だけを示し、他は省略したためである。

図-7は一部にばらつきはあるが、24時間雨

表-5 呉市における斜面崩壊と最大時間雨量

最大時間雨量 (mm/hr)	災害発生数 (件)	出現度数 (%)
0 ~ 9	0	0
10 ~ 19	11	8.9
20 ~ 29	68	55.3
30 ~ 39	0	0
40 ~ 49	44	35.8
50 以上	0	0
計	123	100

表-6 呉市における最大時間雨量の降雨強度別出現率

降雨強度 (mm/hr)	出現率 (%)
0 ~ 9	0
10 ~ 19	64.7
20 ~ 29	19.6
30 ~ 39	11.8
40 ~ 49	3.9
50 以上	0

表-7 呉市における最大時間雨量別相対発生指数 (10mm未満を除く)

降雨強度 (mm/hr) max	相 対 発 生 指 数
10 ~ 19	14
20 ~ 29	282
30 ~ 39	0
40 ~ 49	918
50 以上	0

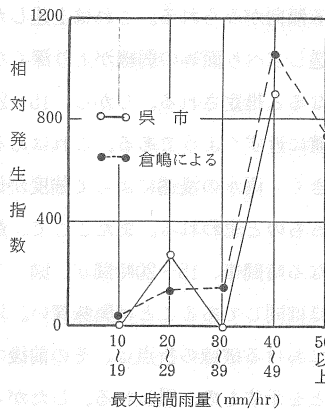


図-6 斜面崩壊の最大時間雨量強度別相対発生指数

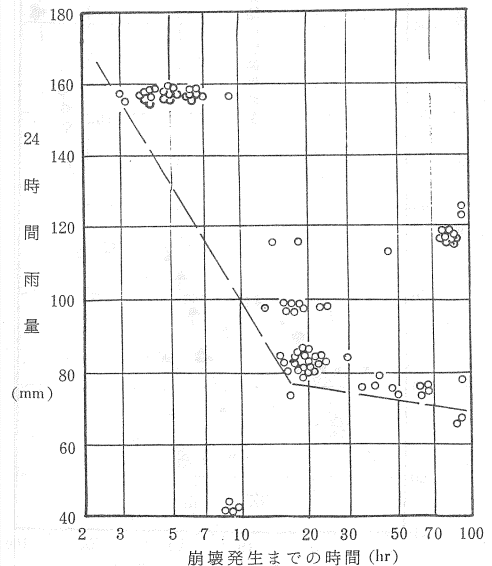


図-7 24時間雨量と崩壊発生までの時間

量の増大とともに崩壊発生までの時間が短くなる、破線のような傾向がみられる。破線の下側に来るものもあるが、概ね上側にあり、破線に対応する時間以降に災害が発生しやすいと言える。最も多い雨量は150～160 mm/dayで、このような降雨の生じる確率は表-2からすれば非常に小さく、2%である。しかしこのような大きな雨量のときは、降雨開始から約3時間で災害が発生している。

一方、80mm/day以下の雨量では急激に長時間化し、遅いものは3日後に発生しているものもある。このように80mm/dayを境に急変するのは、崩壊発生の機構が若干ことなるためではないかと考えられる。例えば、降雨量多く早く崩壊する場合は、雨水の浸透深さが比較的浅く表層土が崩壊しやすいため、その規模は小さい。これに対し降雨量が比較的少なく崩壊発生までの時間が長いものは、雨水が深くまで浸透する時間的ゆとりがあるため、崩壊規模が大きくなると考えられる。

これを確かめるため、崩壊または流出土砂量と崩壊発生までの時間の関係を調べると図-8のよう

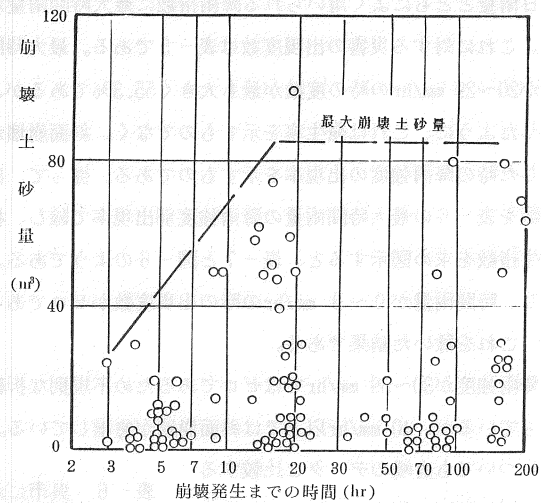


図-8 崩壊土砂量と崩壊発生までの時間

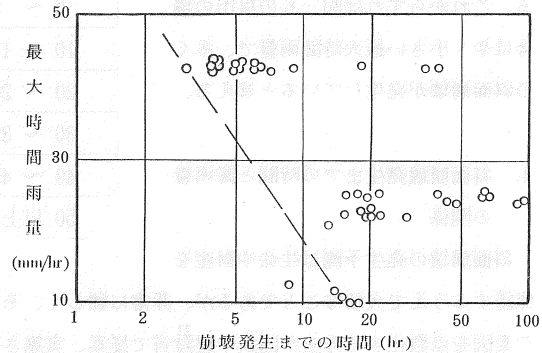


図-9 最大時間雨量と崩壊発生までの時間

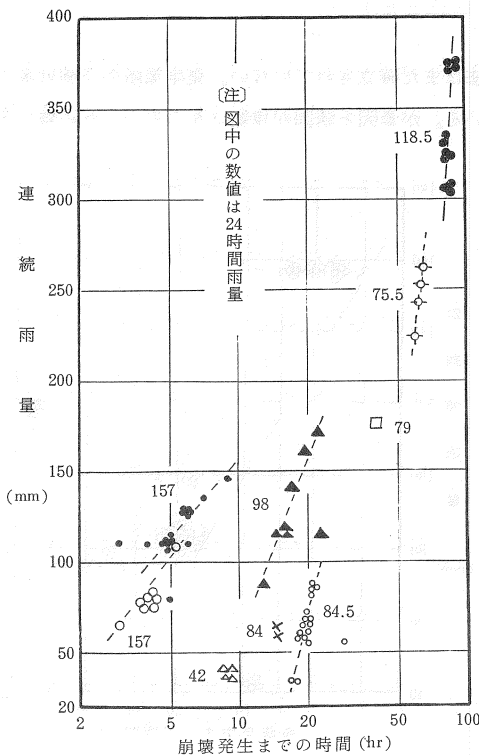


図-10 連続雨量と崩壊発生までの時間

であった。結果はかなりばらついてはいるが、崩壊土砂量の最大値は破線で示すように、崩壊時間に比例して増加する傾向がみられる。これは上述したように、雨水が深く浸透しすべり面等の弱線がより深くなり、崩壊規模が大きくなると推定される。しかし、15～20時間以上になると一定値に近づくようである。これはある深さ以上では強度が大きく、雨水の浸透によって強度が低下してもなお余裕があるものと思われる。またここで、最大崩壊土砂量が一定になる時間帯、15～20時間が、図-7の破線の折点の時間とほぼ同じであることは興味深い。以上のことにより図-7における破線の折点は、その前後で崩壊機構が相違することを示すものと思われる。したがって土砂崩壊時間の予測にあたっては集中豪雨型と長雨型とに区別して考える必要がある。

次に災害の発生には総雨量でなく、短時間の降雨強度も影響することは明らかであるため、最大時間雨量と崩壊発生までの時間との相関性を調べてみると図-9のようであった。最大時間雨量の増大とともに崩壊発生までの時間は短くなり、破線に沿う時間以降に災害は発生するようである。時間雨量が40 mm/hrに達すると、早いものは約3時間で、遅いものは約2日後に発生しており、ばらつきが大きい。ばらつきの原因としては、最大時間雨量は同一でも、その継続時間がまちまちであること、先行降雨の程度が異なる、或いは素因の相違などが考えられる。

以上のように24時間雨量、最大時間雨量と災害発生との関係は、種々誤差の生じやすい要因もあり必ずしも相関性が高いと言えない。そこで、さらにもう一つの崩壊要因として、降雨開始から崩壊発生までの連続雨量との関係を調べてみると図

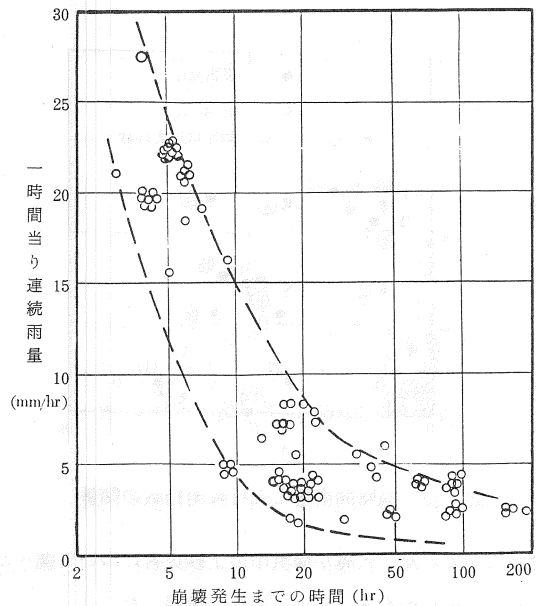


図-11 平均の連続雨量と崩壊発生までの時間

10のようである。なお、図中に示した数値は24時間雨量である。一部例外もあるが、概略24時間雨量が大きいものほど早く崩壊している。それぞれのパラメータごとにみると、片対数の比較的良好な直線的相関関係にある。しかし、この図は縦軸の連続雨量が大きいほど災害発生までの時間が長くなるという、一見、矛盾するような結果を示し分りにくい。崩壊発生までの時間が長くなれば連続雨量（累積雨量）が増大するのは当然であるが、分りやすくするため、連続雨量をその時間で除し、1時間当りの平均連続雨量で示せば図-11のようである。時間当りの連続雨量が減少すると、崩壊発生までの時間は長くなっている。1時間当り連続雨量が15 mm/hr以上では降雨開始後、10時間以内に崩壊するものが多く、10 mm/hr以下では10時間以上経過してから崩壊するものが多い。見方をかえれば10 mm/hr以下の降雨であっても、10時間以上降り続けると斜面崩壊による災害が発生し易いと言える。また、図-7、図-9に比しばらつきの範囲がやや小さく、崩壊発生時間の予測に有用である。

5. 斜面崩壊の発生に及ぼす先行降雨の影響

同一地点に同一雨量が降っても、斜面崩壊の発生する時と発生しない時がある。これは土中に残存している事前降雨の影響が大きい。これを示す値として先行降雨指数（Antecedent Precipitation Index, 以後APIとよぶ）が用いられる。APIの算出方法は種々な文献に見られ、篠原によれば次式で示される。

$$API = R_0 + kR_1 + k^2R_2 + k^3R_3 + \dots + k^nR_n$$

ここに、 R_0 ：当日雨量（mm/hr）、 k ：流域、季節、土質に関する定数、 n ：対象とする降雨開始前の日数、 R_n ：対象とする降雨開始n日目の日雨量（mm/day）

APIは対象とする降雨開始前の日数や定数kのとり方により大きく変化し、アメリカでは $n=30$ 程度をとるようである。日本でも網干²⁷⁾によればまさ土地帯で2週間、それ以外の細粒土を多く含む透水性のよくない地盤では20日間の事前降雨が災害発生に大きく影響するとしている。がここでは $n=7$ 日とした。これは呉市周辺山麓の自然斜面は透水性が比較的大きい砂質ロームに分類されるまさ土が多いこと、地形は急斜面の所が多く、比較的排水されやすいと考えるためである。一方、 k は減少係数とも呼ばれ松尾¹⁰⁾はシルト系土質の斜面で0.7程度

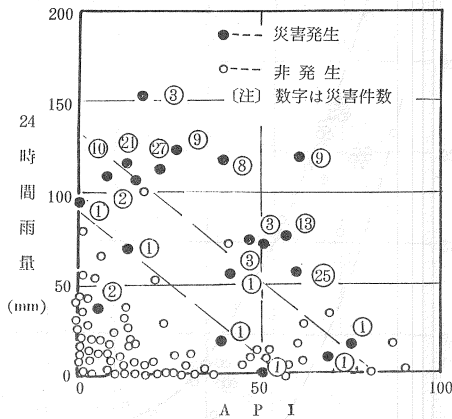


図-12 24時間雨量と先行降雨指数の関係

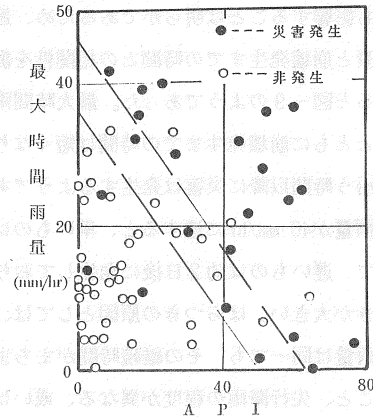


図-13 最大時間雨量と先行降雨指数の関係

が適当としているが、大滝が横浜市の土砂災害について調べたところ、 $k = 0.5$ の時の相関性が最もよい結果を得ている。このため本文においては 0.5 を用いた。

$R = 0$ の表示方法により求めたAPIと24時間雨量の関係を示すと図-12のようである。災害の多発する日、少数の日、非発生の日、が2本の破線で概略3分され、災害が発生する日は破線の上側に位置するものが多い。破線は右下がりでありAPIが大きいくほど、すなわち事前降雨による含水量が高い状態にあるほど、雨量は少なくても災害が発生しやすいことを示している。逆にAPIが小さく前日まで降雨らしきものがほとんどなかったとしても、90mm/day以上の降雨があると土砂崩壊による災害が発生する可能性のあることを示している。図中に示す数値は斜面崩壊の発生件数であり、2本の破線の間にあるものは発生件数は少ないが、2本目の破線より上側で多く発生していることが分る。このように災害の発生日と非発生日との差が明確であるから、当日雨量を推定することにより、APIから災害発生の予知、或いは警戒警報の発令等が可能である。しかし、API算出に用いる雨量は「呉地区の雨量」と言うように対象地域が広く、特定の場所の発生を予知したり、警報発令の基準にできないことは今後の課題である。

一方最大時間雨量とAPIの関係を示せば図-13のようである。2本の破線ではさまれる所を境にして斜面崩壊が多発する日と、非発生日に分けられるが、図-12ほど明確でない。図はAPIが小さく事前降雨がほとんどなくても、約40 mm/hrの強雨があれば災害が発生する可能性のあることを示している。しかし図-9でもそうであったように、最大時間雨量と災害、或いは1時間当りの連続雨量と災害、の関係のほうがばらつきが小さくよい相関性を示す。

6. 自然斜面表層土と地形の特徴

休山周辺など調査対象地区7ヶ所の土の粒度分析を行った結果によれば、粒径は0.002~10.0mmの範囲のものが分布する、均等係数は40~85で、粒度のよい砂質ローム、或いは砂に属するものであった。このようなまさ土が自然斜面の表層を形勢しているため、表層土の崩壊が発生しやすい。呉市における災害の特徴はのつは、表層の浅い所が滑動し、崩壊土砂量が少ないことである。そこで崩壊または流出土砂量の発生率を示せば表-8のようである。5 m³以下の小規模崩壊が最も多く26.1%である。また、10 m³以下のものが50%もあり、小さな土砂崩れが多く発生するのが特徴である。

崩壊土層の厚さは、一つの崩壊面でも端部と中心部で異なるため記録されていない。そこで各々崩壊または流出土砂量を崩壊面積で除すと、崩壊土層の平均厚さが求まる。こうして得られた平均崩壊土層厚さの発生割合を

表-8 崩壊または流出土砂量の発生率

土砂量 (m ³)	5以下	5~9	10~14	15~19	20~24	25~30	30以上
発生件数	29	24	14	5	11	2	26
発生率 (%)	26.1	21.6	12.6	4.5	9.9	1.8	23.4

表-9 平均崩壊土層厚さ

平均崩壊土層厚さ (m)	0.35 以下	0.35 ~ 0.7	0.7 ~ 1.0	1.0 ~ 1.5	1.0 以上
発生件数	43	33	2	8	2
発生率 (%)	48.9	37.5	2.3	9.1	2.3

示すと表-9のようである。ただし、崩壊面積は資料に記録されている崩壊高さと同幅を乗じたもので、厳密に測定したものではない。表は35cm以下のごく薄い平均崩壊土層厚さのものが最も多く約50%で、100 cm以下の土層厚さのものが約90%近くもある。したがって、呉市における斜面災害の特徴の一つは、小規模で薄い表層土の崩壊と言える。このため崩壊の前兆もほとんどみられず、突発的に発生し短時間で終了するタイプのものが多い。

呉市休山周辺は土砂崩壊による災害の多い所としてよく知られているが、呉市に隣接する熊野、黒瀬の両町、ならびに、近接している東広島市などは、災害の発生記録が残されておらず、このことは以外と知られていない。これは呉市が周辺山麓まで宅地化されていることと、自然斜面であっても何らかの人工的な手が加えられた場所などが多いなどの理由が考えられるが、その他、自然斜面の傾斜角、起伏などの地形的要因に差があるためと思われる。そこで、地形的要因について調べるため、呉市と東広島市の住宅地区と山林地区の境界の斜面傾斜角と起伏量を地形図上からホートン法により求め図示すると図-14のようである。地形図の縮尺は2万分の1、等高線の間隔は20mであり、これに一辺が200

mの方眼を描き平均傾斜角を求めた。図中の○印、●印は災害の発生とは無関係に選り出したもので、×印は呉市内の災害発生地区について調べた結果である。呉市内地区の場合、平均傾斜角が20~35°の範囲に集中し、起伏は50~100 mに集中している。これに対して東広島市の場合、平均傾斜角20°以下、起伏は50m以下に集中している。すなわち、呉市は地形的に急峻で土砂流出のポテンシャルが大きく、これが近接市町より斜面崩壊による災害の多い原因と言える。

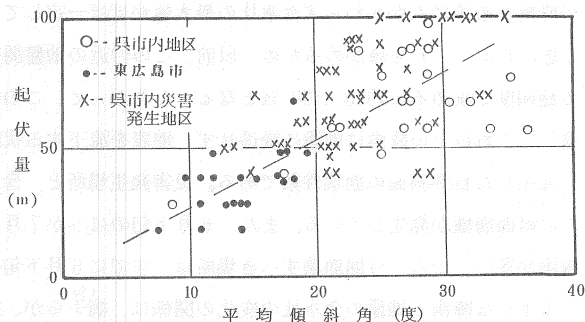


図-14 地形の特性と災害

7. 降雨量と実際地盤における含水比の変化

事前降雨による地盤の乾湿と当日雨量は斜面災害の発生と深い関わりがあるため、降雨により実際地盤の含水比がどのように変化するかを把握することは重要である。そこで休山と隣接している大空山の頂上近くの平坦地 (No.1) と、中腹の傾斜地 (No.2) の2ヶ所で含水比の変化を連日測定した。No.1は切土された所であるため、草木の根はほとんど無いまき土で、No.2は草のよく茂った草根の影響がある自然斜面である。粒度試験の結果はNo.2がやや細粒子が多かったが、ほぼ同じ粒度のものが、同じ割合で含まれる、粒度のよい砂質ローム、または砂に属する土である。含水比は測定時刻と試料の採取深さにより異なるから、毎日15時頃、地表から15~20cmの

深さで採取した試料について測定した。測定時期は昭和60年6月下旬から、7月中旬までの梅雨期である。一部に測定できない日もあるが、得られた含水比の24時雨量と対応させ示せば図-15のようである。

本年は特に降雨量が多く、6月下旬から7月上旬にかけて波状的に集中している。降雨と含水比の変化は必ずしも対応していない日もあり、例えば6月25日は大きな降雨にもかかわらずNo.1の含水比は増大しているが、No.2のものは減少している。逆に7月3日も71mm/dayの降雨があったにもかかわらず、No.1の含水比は低下しているが、No.2のものは増大している。このように必ずしもよい対応を示していない。その理由は測定

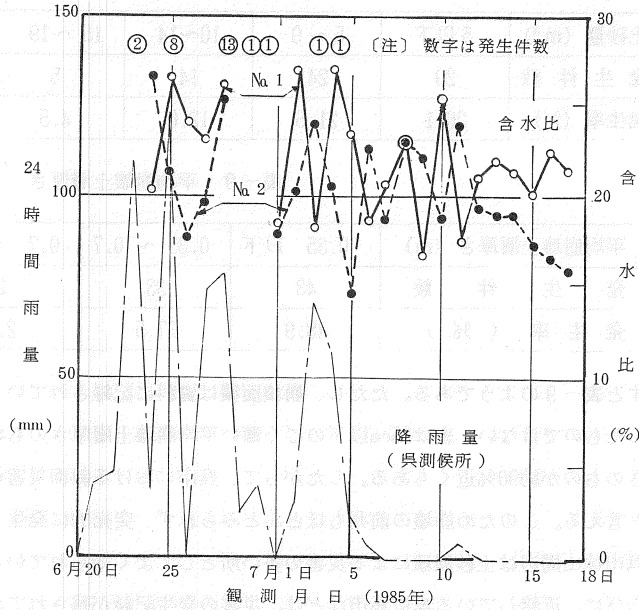


図-15 24時間雨量と含水比の対応

技術、試料採取方法に問題もあるが、降雨時刻と含水比測定時刻が一致していないこと、事前降雨の影響が複雑に関係あっていること、表層の繁茂状況などがあるため、必ずしも不自然でないと思われる。

ところで、No.1の結果に注目すると、含水比の最大値は約27%でほぼ一定である。6月下旬のように連日かなりの降雨があるにもかかわらず含水比の最大値がほぼ一定していることは、この地盤が飽和状態に達していたためと思われる。これを確かめるため、以前、この付近の地盤調査をした際のデータを用い含水比が26~27%に対する飽和度を求めると約70~100%となる。したがって、この地盤は含水比が26~27%に達するとほぼ飽和状態に達し、これ以上の降雨は地盤に浸透せず、地表を流下する状態にあったと考えられる。図中に示す数値は、当日、発生した自然斜面の崩壊件数である。災害発生場所と、含水比の測定場所は異なるが、飽和状態に近い日に多くの斜面崩壊が発生している。また、6月下旬のほうが7月上旬より発生件数が多い。これは6月下旬のほうが降雨が多いことと、今回崩壊すべき場所は、すでに6月下旬に崩壊してしまっているためと思われる。

このような降雨と地盤の含水比の変化の関係は、網干ら¹³⁾が、斜面における含水比が一定に減衰するまでの日数を求めるため、広島市内で調べている。それによれば、減衰速度は地盤の深さにより異なるが、ほぼ20日後で一定値に減衰するとしている。網干らは深さ40cm以上の所で調査しているのに対し、ここでは、15~20cmの深さの所で測定している。まさ土の種類、密度、調査時期等によっても減衰は影響されるため単純に言えないが、本研究においては、夏季と冬季の観測データを参考にすると、約10日で一定値に減衰するようであった。既述のAPIを算出する際、対象とする降雨開始前の日数nを7日としたのはこのためである。

8. むすび

呉市における昭和54~56年度（一部に47、60年度を含む）の自然斜面の崩壊に関する資料を用い、災害予知の可能性を探るため、災害の発生と降雨、地形、土の物理・力学的性質との相関性を調べた。得られた主な結果をまとめると以下のようである。

- (1) 呉市における自然斜面の崩壊は24時間雨量75mm/day以上、最大時間雨量40mm/hr になると急増し、一般

に考えられるよりも小さい降雨で災害が発生している。そして発生する斜面災害の70%近くが125 mm/day以下の降雨によって生じている。この点が全国的な斜面災害に比べて極めて特異である。

(2) 先行降雨指数APIと24時間雨量の関係はよい相関を示し、更に災害の発生日と非発生日とは明らかに差がみられる。したがって、当日の雨量が推定されれば、災害発生の有無の予知が可能である。しかし、雨量、APIともに広い地域を対象にした値であるから、災害発生場所を予測するような狭い範囲の推定をするためには、その地域の資料を収集解析しておく必要がある。

(3) 地形図上から得られる平均傾斜角と起伏の関係から、災害の発生しやすい地形の判別が可能で、呉市の場合、平均傾斜角15°以上、起伏40m以上の所に災害が多く発生している。呉市に隣接する安芸郡熊野町、賀茂郡黒瀬町ならびに東広島市などでは、平均傾斜角、起伏ともに呉市以下の所が多い。このため、呉市は明らかに災害の発生しやすい地形といえる。

(4) 降雨の多い時期には、呉市大空山における表層土の含水比は約26~27%に達すると、それ以上増加しない傾向がみられる。このような時、呉市全体の地盤は飽和状態近くにあると思われ、災害が多く発生している。

謝 辞

最後に、本研究をすすめるにあたり多くの災害資料の提供をされるなど、種々協力をいただいた呉市建設局の西脇一夫、迫田文麿、樋吉賢二、荒木伸治の各氏、また雨量記録を提供された呉測候所の方々に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 高橋 悟・田中弥寿男：まさ土の風化とその判定方法について，地盤と建設，Vol.1，No.1，pp.1~8，1983
- 2) 内田一郎：新編道路工学，森北出版，pp.158~159，1982
- 3) 石井義明：試料と容器間の漏水の影響を考慮した一透水試験，昭和58年度土木学会中国四国支部学術講演会概要集，pp.221~222，1983
- 4) 道上正規・小島英司：豪雨によるがけ崩れの予知について，第17回自然災害科学シンポジウム講演論文集 pp.131~134，1980
- 5) 倉嶋 厚：注意報，警報の対象としての斜面崩壊について，測候時報，40.12，pp.429~445，1974
- 6) 石井義明・星 健三：呉市におけるがけ崩れと降雨、地形、地質の関係について，昭和60年度土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集，pp.221~222，1985
- 7) 小橋澄治：斜面安定，鹿島出版会，pp.22~37，1975
- 8) 篠原謹爾：河川工学，共立出版，pp.75~76，1975
- 9) 網干寿夫：集中豪雨とマサ土斜面の崩壊，施工技術，Vol.5，No.11，pp.44~45，1972
- 10) 松尾 稔：地盤工学信頼設計の理念と実際，技報堂出版，pp.227，1984
- 11) 大滝俊夫：横浜市内の崖崩れの予報，研究時報，14，pp.459~465，1962
- 12) 小橋澄治，他6名：地すべり、崩壊、土石流、予測と対策，鹿島出版会，pp.174~175，1980
- 13) 網干寿夫，井上年行：真砂土斜面の災害予測について，昭和49年度土木学会中国四国支部学術講演会概要集，pp.74~75，1974