

II-4 降水指標による地すべり警戒基準に関する調査

研究予算：運営費交付金（治水勘定）

研究期間：平 15～平 16

担当チーム：地すべりチーム

研究担当者：藤澤和範、鈴木将之

【要旨】

地すべり警戒基準雨量設定手法の提案を目的として、伸縮計・水位計データとアメダス降雨データを整理した。降雨量と地すべりの移動量との関係は必ずしも明確ではなかったが、降雨件数と地盤変位件数に着目することで、降雨量に基づく概略地すべり危険性評価が可能な地すべりがあることがわかった。さらに、地盤変位件数、水位上昇件数と実効雨量ならびに降雨後の最高実効雨量との関係を調べた結果、抽出条件ごとに計算結果のばらつきはあるものの、全体としては長期間一定の観測態勢を継続すれば、初期段階の地すべり降雨警戒基準を設定することがわかった。

キーワード：地すべり警戒基準、地盤変位、降雨、頻度、実効雨量

1. はじめに

土砂災害軽減の観点から、土砂災害に対する警戒避難体制の充実が今後ますます重要になってくる。気象情報を活用し土砂災害を軽減しようとするならば、降雨と災害の発生危険度との関係をできる限りわかりやすく整理する必要がある。例えば、雨量に基づくがけ崩れや土石流の警戒基準として、累積雨量と雨量強度をプロットし、発生・非発生の境界を求めて基準雨量を設定する方法が普及している¹⁾。

一方、降雨と地すべり活動との関係についてみると、降雨量と個々の計器の移動量データとの対応は必ずしも明瞭ではない。降雨と地すべり活動の危険度との関係を統計的に見いだす手法が定式化されていないため、現在、地すべりにおいては、地盤伸縮計などにより計測された移動量をもとにその危険度を判断する²⁾ことが一般的である。

これに対し降雨データは、①予測降雨を活用しうる、②日本全国同じ精度で入手可能、などの利点を有する。このため、より早期の警戒避難体制に向け、統計手法の確立により降雨データを用いた地すべり警戒基準が設定されることが望ましい。

予察的な検討により、ほぼ同じ降雨量に対しても、土塊の移動量や、降雨から移動開始までの遅れ時間が一定でない現象が認められた。このような現象のため、地すべりが発生したという情報と降雨量データのみでは、危険度を判断する指標を構築するのは難しい。

一般に地すべりは間隙水圧等の外力が一定値以上になると移動を開始し、減少すると移動を停止する運動形態を持つものが多い³⁾といわれる。しかし地すべり全体のうちどの程度がそのような運動形態として説明可能であるかは明らかではない。また、その値を超過したときに「必ず」地すべりが発生するような一定値の存在を疑問視する観測結果³⁾も報告されている。

そこで本調査では、複数の計器の観測データに基づき降雨と土塊の移動との統計的な関係を調べることにした。たとえば気象条件、地形や地質で限定した地域内の地すべりを対象に、観測データを一括して処理することにより、降雨による危険度の増大を定量的に表現し、初期段階の降雨警戒基準を求める手法の提案を目指した。

観測データに依拠して地すべり降雨警戒基準を検討する際、課題となるのは、エラーデータの処理、欠測への対応も含めた、統一的な処理手順づくりである。

野外で自動観測を行っているため、地すべり観測データはさまざまな要因のエラーデータを含むことが認識されている。これに対し、多種多数の観測が行われている貯水池周辺斜面に対しては、観測値の重回帰分析により管理基準を設定する手法が提案されている⁴⁾。

しかし長谷川ら(2004)⁴⁾も指摘しているように、原因を特定できなければ、エラーデータだけを一律

に除去したり補正したりする方法は本来ない。また地すべり土塊の運動は本来緩慢であると考えるので、変位の累積性を判断する前に小さな日変位量のデータを排除することはできない。

そこで、現実的な方法として、結論の表現は鮮明ではなくなるが、エラーデータや欠測を少々含んでも結論に影響しないような分析を行うことになった。本調査では1つの方法として、伸縮計の読みに対し「累積傾向の有無」で地すべり活動を判定するところから、これを「ある日数における変動の件数」と定義して、頻度の分析を行うことにした。

この方法は、1個の地すべりに完璧な計測と解析を行ってその結果を他の地すべりに当てはめようとするのではなく、既存の観測データの中で大部分について成立する法則性を見いだして基準につなげようとする考え方に立っている。

地すべり警戒基準の検討にあたり、降雨による地すべり活動危険度の評価が最初の課題と考え、データ整理を行った。本報告では、まず最初に、地盤変位および水位上昇と降雨との関係を、それらの頻度と程度に着目して調べた結果を述べる。

2. 降雨と地盤変位および水位上昇との関係の検討

2.1 検討方法

地盤伸縮計変位および孔内水位に対する降雨の影響について検討するため、表1に示す宮崎、静岡両県の15地すべり地のうちAからNの各地区における最近5年程度の地すべり観測データ、およびアメダス降雨量データを収集し、整理した(表1)。観測期間中には対策工の施工期間も含まれる(表2)。

アメダス降雨量データについて、日雨量20mm以上を観測した事例の件数(以下、降雨件数と称する)を集計した。日雨量20mmとしたのは、後述する地盤変位件数、水位上昇件数の集計にあたって日変動量の上位10%までのデータを用いたことに概ね対応させるためである。日雨量20mmの年間出現頻度は約15%(55日前後)である。

地盤伸縮計および水位観測データについて、日変化量のヒストグラムを作成した(図1、図4)。今回収集した観測データは、2地区の一部の計器を除いて概ね日単位であったので、日データのみを対象とした。

2.1.1 地盤変位・孔内水位上昇事例の抽出

地盤変位データ全体では、日変位量0mmが80%程度、伸張、圧縮が約10%ずつを占めている(図1)。

また、孔内水位データ全体では、日変動量±0.05m未満が約65%、日水位低下量0.05m以上が約22%、日水位上昇量0.05m以上が約14%を占める(図4)。

全体に著しい変動が少なく、時系列グラフでは変動開始点が明らかでないものが多いので、降雨と対比する変動開始点の抽出方法として、日変動量の上位10%までのデータに着目することにした(ここで抽出したデータの頻度を以下それぞれ地盤変位件数、水位上昇件数と称する)。地盤変位については、伸張・圧縮の頻度がほぼ同じであるため、日変位量の絶対値をとり、その上位10%までを抽出した。

なお、同じ地すべり地でも計測している計器数は時期により異なる。このため、地盤変位・水位上昇件数に関する議論では、抽出した件数を観測データ数で除し割合を求めた。図2、3、5、6の月別地盤変位件数および水位上昇件数の割合は、月間の地盤変位件数および水位上昇件数をそれぞれ月間のデータ数で除したものである。表3(b)、4(b)では、毎日の地盤変位件数および孔内水位上昇件数を当日の計器

表1 対象地すべりとアメダス観測点

県	地区	所在地	地盤伸縮計 (基)	孔内水位計 (基)	アメダス観測点	
宮崎	A	東臼杵郡	20	12	高千穂・中小屋・北方	
	B	東臼杵郡	10	6		
	C	宮崎郡	40	9		
	D	南那珂郡	11	13		
	E	南那珂郡	8	13		
	F	南那珂郡	13	15		
静岡	G	掛川市	0	2	三倉・掛川・牧の原	
	H	掛川市	3	8		
	I	掛川市	11	8		
	J	小笠郡	9	11		
	K	磐田郡	0	5		
	L	磐田郡	2	6		
	M	磐田郡	1	16		
	N	磐田郡	1	11		
	O	静岡市	38	45		本川根・井川・梅ヶ島

表2 収集データ期間内の各地区の対策工

地区	対策工内容
A	H11年12月-H12年4月杭、H12年4月-9月集水井
B	H15年7月横ボーリング
C	H12年8月-H13年3月集水井
D	H12年5月-10月集水井、H12年6月-11月鋼管杭
E	H14年5月-11月集水井
F	H15年集水井掘削中
G	H10年3月集水井完成
H	H15年3月-5月集水井完成
I	
J	H12年3月抑制工・抑止工完成
K	H10年3月、H14年2月、H15年3月、9月横ボーリング
L	H13年1月、11月、H15年3月集水井完成
M	H11年5月、H13年6月集水井完成
N	H11年6月アンカー完成、H11年3月、6月集水井完成
O	H1年-H5年排水トンネル・集水井、H10年-H15年集水井

数で除したものを集計した。

2. 2. 2 降雨域の偏りと遅れ時間への考慮

今回扱ったのは日単位の地盤変位・孔内水位データであること、またがけ崩れや土石流と異なりピンポイント・短時間の予測を目指していないことにより、雨量データとしてアメダス降雨量を用いた。対象地すべりと直近のアメダス観測点間の距離は、最も近いもので0.6km、最も離れたもので13.0kmある。

対象地域は山地を主とするので、10km程度離れた2点では、ある短い時刻をとれば降雨量が大きく異なることも多いものと推定した。また、比較的弱い降雨が数日以上続き、かつ一時的にまとまった降雨がある状況が地すべりの活動を促すことを想定した。このような降雨では、どの降雨が地すべり活動の引

き金になったのか必ずしも明瞭ではなく、降雨から地すべり活動までの遅れ時間も定義できない。

これらの事情を考慮し、3.3で降雨件数と地すべり観測データの変化件数との対応を調べるにあたっては、表1の最右列に示すアメダス観測点における降雨件数を合算集計した。表1のA・B、C～F、G～J、K～Nの区分は、気象台の予報細分区に概ね対応する地域となるようにした。これらの地域内で各アメダスの降雨件数を合算したものを、30日の時間幅をとって集計した。

2. 2. 3 実効雨量の計算

計測期間が長く、変動が大きい計器を各地すべり地から1基ずつ選び、地すべり地から直近のアメダス観測点の降雨量を用いて、日変位量および孔内水

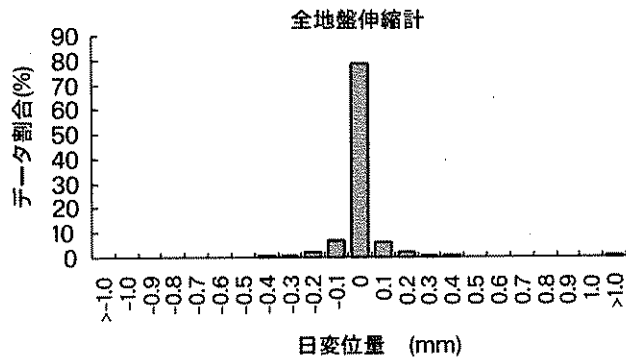


図1 地盤変位ヒストグラム

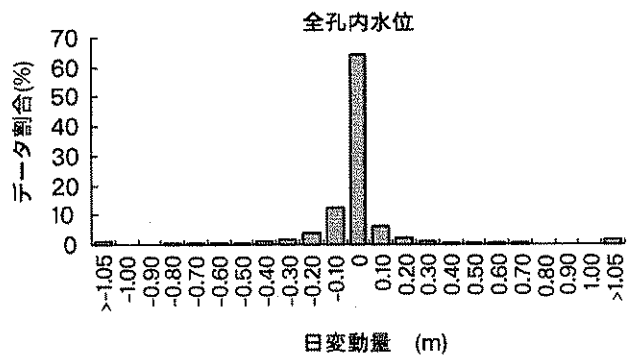


図4 孔内水位変動ヒストグラム

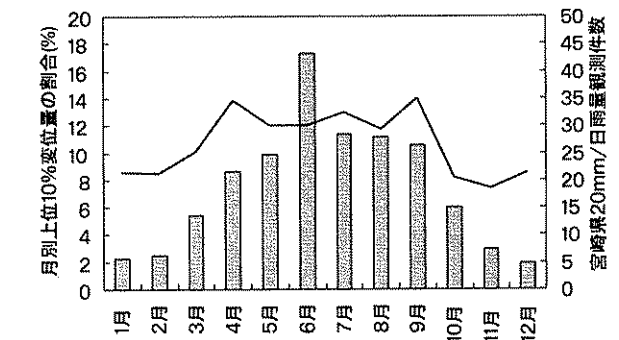


図2 月別変位件数の割合（折れ線）と20mm/日雨量観測件数（宮崎県）

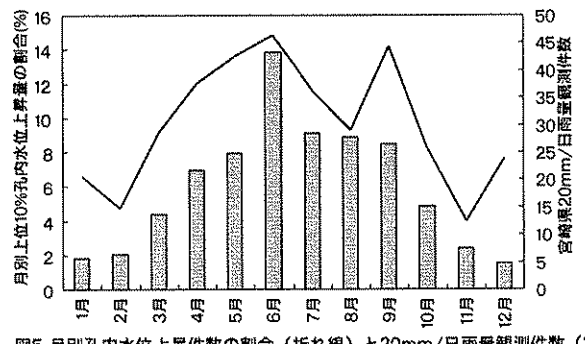


図5 月別孔内水位上昇件数の割合（折れ線）と20mm/日雨量観測件数（宮崎県）

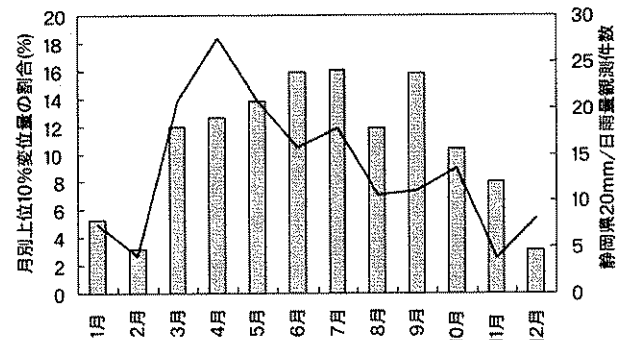


図3 月別変位件数の割合（折れ線）と20mm/日雨量観測件数（静岡県）

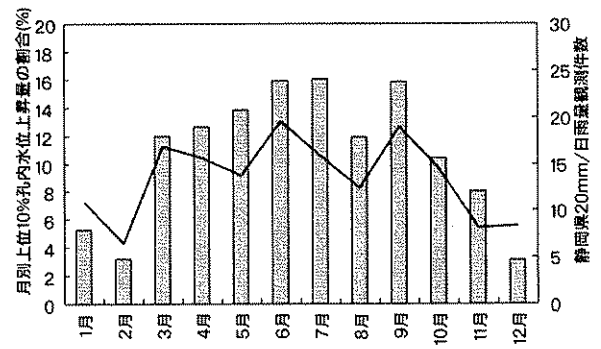


図6 月別孔内水位上昇件数の割合（折れ線）と20mm/日雨量観測件数（静岡県）

位によく合う実効雨量半減期を調べた (表 3(a), 4(a))。実効雨量は、次式による。

$$R_G = R + R_G' \times 0.5^{1/T}$$

ここに R_G : 実効雨量
 R_G' : 前日の実効雨量
 R : 当日の雨量
 T : 半減期

1 日から 30 日までの半減期について計算し、日変位量および孔内水位との相関係数が最大となるものを最適な半減期として採用した。

3. 結果

3.1 地盤変位量と降雨指標 (実効雨量) との関係

対象とした 12 基の地盤伸縮計のうち 9 基について、地盤変位量と実効雨量との間に有意な相関が認められた (例: 図 7)。しかしながら相関係数は概して低く、観測期間を通じた地盤変位量を降雨指標から直接予測することはできない (表 3(a))。言い換えれば、土塊の移動速度が実効雨量に比例するとは限らない。地すべり滑動後短時間のデータをプロットするとそのようにみえるものもあるが、今回扱ったデータについては、両者を直接関係づけがたいものが多い。

3.2 孔内水位と降雨指標 (実効雨量) との関係

対象とした 14 孔の水位計のうち 12 孔について、孔内水位と実効雨量との間に有意な相関が認められた (表 4(a)、例: 図 9)。全般に孔内水位は地盤変位より降雨に対する反応がよく、適切な半減期を設定することで、実効雨量から直接予測可能なものも多い。

3.3 地盤変位件数および水位上昇件数と降雨件数との関係

20mm/日以上のアメダス降雨観測後 30 日間における、20mm/日以上降雨件数と地盤変位件数ならびに水位上昇件数との関係を調べた。月別にみると、地盤変位事例および水位上昇事例が含まれる割合は、両県とも 3 月から 10 月にかけて高く、降雨件数が多い時期に地盤変位や孔内水位上昇が多く発生するといえる (図 2、3、5、6)。

地盤変位件数については 12 地すべり中 9 地すべりにおいて (表 3(b)、例: 図 8)、水位上昇件数については 14 地すべり中 13 地すべりで、それぞれ降雨件数と危険率 5% で有意な相関が認められた (表 4(b)、例: 図 10)。

4. 考察

4.1 降雨と地すべり変位との関係

全地すべり地で、実効雨量と日変位量との間か、降雨件数と地盤変位件数との間のどちらかには有意な相関が認められた。総合すると、観測によれば、降雨と地すべり変位との関係は、降雨量と降雨の頻度が、変位量と変位の頻度に影響を及ぼす関係となっている。

そこで、日変位量が比較的小さい場合、降雨量から変位量を直接予測するより、降雨件数と変位件数との関係を求め、変位の累積を十分小さな値に抑える雨量水準を探索するのが実用的と考える。

表3(a) 実効雨量と日変位量との相関分析

地区	機器名	最大日変位量[mm]	データ数	半減期(日)	相関係数	t値	実効雨量との相関 有意性の有無
A	S-6 (自動)	214.9	569	1	0.641	19.9	○
B	S-4	202.4	409	3	0.174	3.6	○
C	2-A(S-2)	7.8	1,424	30	0.287	11.3	○
D	S-4	11.0	562	1	0.089	1.6	×
E	SD-3	9.7	662	4	0.382	10.5	○
F	S-A4	3.0	331	30	0.028	0.5	×
H	S-1	1.2	215	1	0.724	15.3	○
I	S-9	367.7	349	2	0.336	6.6	○
J	S-4	17.6	135	1	0.685	10.8	○
L	S-3	0.8	608	30	0.066	1.6	×
M	S-1	1.4	830	30	0.083	2.4	○
N	S-1	0.2	873	6	0.279	8.6	○

(相関係数のt検定)

表3(b) 降雨件数と変位件数との相関分析

地区	データ数	相関係数	t値	降雨件数との相関 有意性の有無
A	233	0.576	10.7	○
B	87	0.754	10.6	○
C	236	0.030	0.5	×
D	148	0.312	4.0	○
E	103	0.212	2.2	○
F	58	0.288	2.2	○
H	65	0.199	1.6	×
I	181	0.410	6.0	○
J	27	0.056	0.3	×
L	169	0.260	3.5	○
M	187	0.247	3.5	○
N	171	0.485	7.2	○

(相関係数のt検定)

表4(a) 実効雨量と孔内水位との相関分析

地区	機器名	データ数	半減期(日)	相関係数	t値	実効雨量との相関 有意性の有無
A	B11-3	1,191	3	0.741	38.1	○
B	B-2	562	1	0.383	10.0	○
C	B-3	1,292	1	0.114	4.1	○
D	BVA-1	329	6	0.662	16.0	○
E	BVB-1	562	5	0.354	9.0	○
F	BV-62	297	1	0.171	3.0	○
G	BV-7-1	170	1	0.032	0.4	×
H	BV-3	426	2	0.090	1.9	×
I	VB-6	984	2	0.638	26.0	○
J	BV-10	377	2	0.158	3.1	○
K	A-3	369	5	0.732	20.6	○
L	C-1	765	11	0.385	10.8	○
M	BV-4'	701	6	0.756	30.5	○
N	BV-2	843	5	0.120	3.5	○

(相関係数のt検定)

表4(b) 降雨件数と水位上昇件数との相関分析

地区	データ数	相関係数	t値	降雨件数との相関 有意性の有無
A	255	0.382	6.6	○
B	88	0.840	14.3	○
C	216	0.653	12.6	○
D	136	0.507	6.8	○
E	97	0.703	9.6	○
F	49	0.570	4.8	○
G	45	0.266	1.7	×
H	62	0.507	4.6	○
I	187	0.685	12.1	○
J	64	0.390	3.3	○
K	153	0.693	11.8	○
L	169	0.539	8.3	○
M	194	0.636	11.4	○
N	160	0.788	16.1	○

(相関係数のt検定)

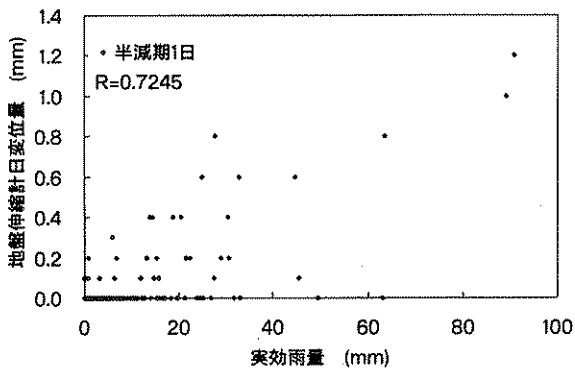


図7 実効雨量とH地区S-1地盤伸縮計日変位量との関係

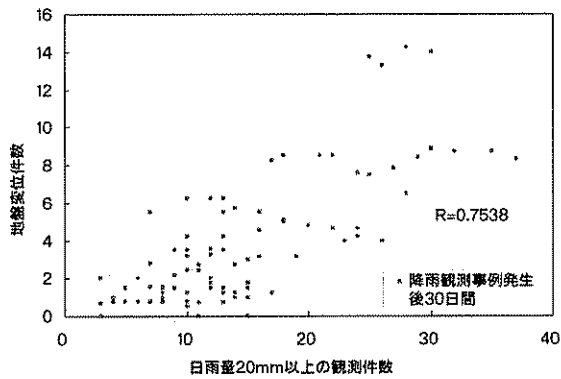


図8 降雨件数とB地区地盤変位件数との関係

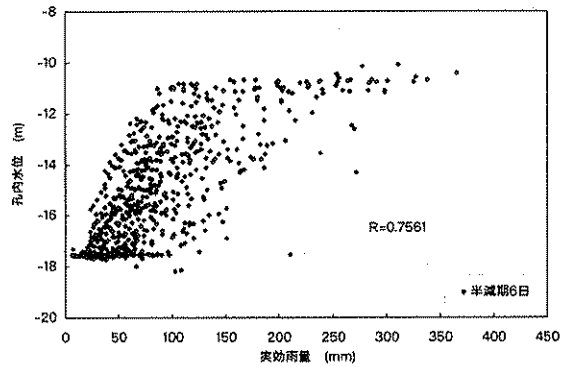


図9 実効雨量とM地区BV-4'孔内水位との関係

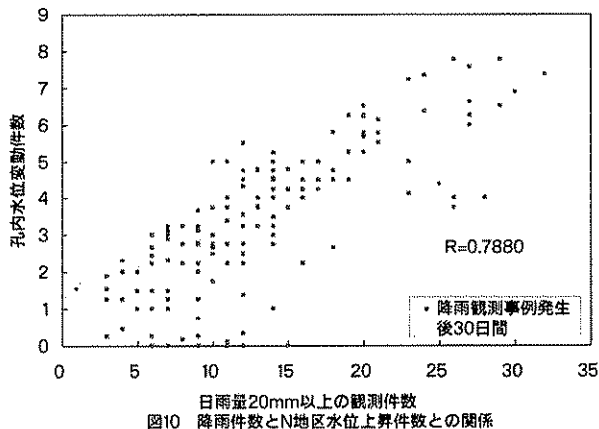


図10 降雨件数とN地区水位上昇件数との関係

一方、滑落に近い大きな日変位量に対しては、降雨量の明瞭なしきい値を個々の計器で見いだす可能性があるが、事例が少ないので、降雨と変位の関係については微小な変位および孔内水位の情報と対照して検討する必要がある。孔内水位の変動傾向と移動量との関係については、実際に観測も行い個別の事例を詳細に検討することが必要と考える。

5. 地すべり警戒基準雨量の計算

前章までは、多数の降雨事例と観測事例を対照することを意図して、地すべり観測データとアメダス降雨量データを整理し、降雨と地すべり土塊の移動との関係を調べた。

その結果、変位量そのものと雨量との関係は必ずしも明瞭ではないが、地盤伸縮計および孔内水位計の観測値の変化と降雨の頻度に着目することにより、降雨により地すべりの活動危険度が增大する関係がある程度示しうることがわかった。

以下では、地盤変位件数、水位上昇件数と、実効雨量ならびに降雨後の最高実効雨量との関係を調べ、降雨による活動危険度を評価し、降雨指標による警戒基準（地域限定的）設定手法について検討を加える。

5.1 検討方法

表1に示す宮崎、静岡両県の15地すべり地における最近5年程度の地すべり観測データ、およびアメダス降雨量データを整理した。観測期間中には対策工の施工期間も含まれる（表2）。

以下の雨量基準の計算においては、降水指標として実効雨量を採用した。地盤変位および水位変動を最もよく説明する実効雨量の半減期は、計器により異なることが表3(a)、表4(a)に示されている。しかしながら、異なる半減期による基準雨量が併存すると混乱を来すことは明らかであるから、基準雨量を計算する上では半減期を統一する必要がある。ここでは表3(a)、表4(a)を参考に半減期を5日とした。

雨量基準の考え方として、大きくわけて2つの種類について検討を行った。

まず、ある程度大きな地盤日変位量、水位日上昇量、もしくは高い水位を記録する日の実効雨量が何mm以上ということができれば、その実効雨量を基準として考えることができる。この方法によって得られる実効雨量の基準値を、地盤変位しきい実効雨量、水位上昇しきい実効雨量、水位しきい実効雨量とそれぞれ名付ける。

もうひとつは、降雨があったのちに変位や水位上昇が発生することを想定しているのであるから、ある程度の降雨後、期間を設けて地すべり地ごとに変位や水位上昇の件数を集計し、それがあつた件数を上回る場合、期間中の最高実効雨量が何mm以上であるかを調べる方法である(参考図1参照)。この方法によって得られる実効雨量の基準値を、地盤変位件数しきい実効雨量、水位上昇件数しきい実効雨量とそれぞれ名付ける。

対策前、対策後、全期間のそれぞれについて、地盤伸縮計および孔内水位計データと降雨の抽出条件、集計期間を表7～表11に掲げる各ケースに設定して計算を行い、計算の可否と得られた基準値の妥当性を検討した。対策前、対策後の期間は、県提供の資料や水位データに基づき表5のように設定した。

5. 1. 1 計算方法

地盤変位しきい実効雨量の計算では、地盤日変位量が抽出条件以上である日(以下「変位あり」と、抽出条件以下である日(同「変位なし」)の度数を、それぞれ、実効雨量1mmから300mmまで1mmごとに集計した(参考表1参照)。ある実効雨量における変位ありの理論度数を次の式で算出した。

$$\text{理論度数} = (\text{ある実効雨量の日数}) / (\text{全観測日数}) \times (\text{全変位件数})$$

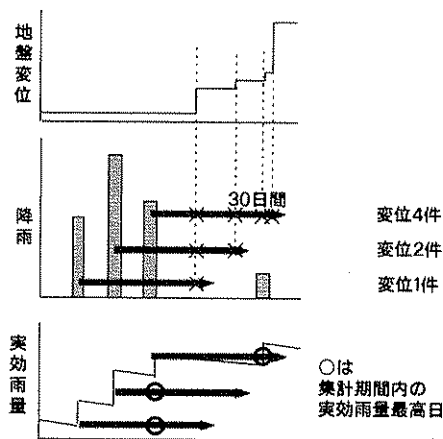
例えば参考表1の実効雨量8mmにおける変位ありの理論度数は、

$$(8 + 2) / (1268 + 83) \times 83 = 0.614$$

と計算される。各実効雨量において変位ありの累計相対度数と変位あり理論度数の累計相対度数の差の絶対値、 d を計算し、 d の最大値 D および D を与える実効雨量をまとめた。各抽出条件に対する D を与える実効雨量を地盤変位しきい実効雨量とした。

表5 対策前・対策後期間の設定

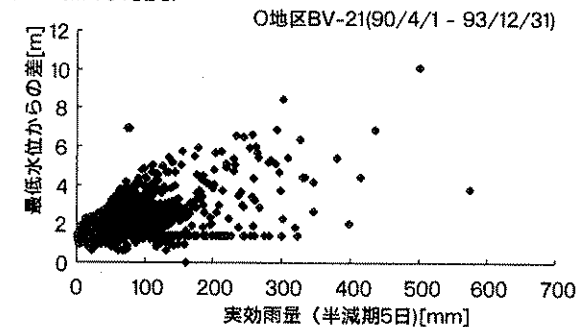
地区	対策前期間	対策後期間
A	～H11年11月30日	H11年12月1日～
B	～H15年6月30日	H15年7月1日～
C	～H13年2月28日	H13年3月1日～
D	～H12年4月30日	H12年5月1日～
E	～H14年7月31日	H14年10月4日～
F	～H15年5月14日	H15年5月15日～
G	なし	H10年3月1日～
H	～H15年2月14日	H15年3月2日～
I	～H15年9月10日	なし
J	～H12年2月29日	H12年3月1日～
K	なし	H10年3月1日～
L	～H12年12月31日	H13年1月1日～
M	～H11年4月30日	H11年5月1日～
N	～H11年2月28日	H11年3月1日～
O	～H8年3月31日	H8年4月1日～



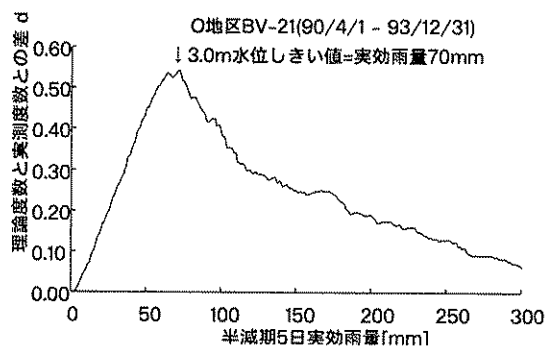
参考図1 降雨日以後の変位件数と実効雨量最高日の集計(集計期間30日間の例)

参考表1 1～300mmまでの実効雨量におけるO地区S-11地盤伸縮計(対策前期間)2mm/日変位度数分布表

実効雨量 [mm]	変位なし度数	変位あり度数	変位あり理論度数	変位あり理論度数の累計相対度数	変位あり理論度数の累計相対度数	相対度数の差 d
1	0	0	0.000	0.000	0.000	0.000
2	3	0	0.184	0.000	0.002	0.002
3	10	0	0.614	0.000	0.010	0.010
4	13	0	0.799	0.000	0.019	0.019
5	12	0	0.737	0.000	0.028	0.028
6	9	0	0.553	0.000	0.035	0.035
7	10	0	0.614	0.000	0.043	0.043
8	8	2	0.614	0.024	0.050	0.026
中 略						
298	0	0	0.000	0.976	0.999	0.023
299	1	0	0.061	0.976	1.000	0.024
300	0	0	0.000	0.976	1.000	0.024
計	1268	83	83			



参考図2 O地区BV-21孔内水位と実効雨量の関係



参考図3 O地区BV-21孔内水位計(90/4/1-93/12/31)の3.0m水位しきい実効雨量計算

水位上昇しきい実効雨量、水位しきい実効雨量も地盤変位しきい実効雨量と同様の方法により計算した。計算結果の例を、水位と実効雨量との関係が参考図2のようである、0地区BV-21孔内水位計の、3.0m水位の場合について参考図3に示す。この場合 d の最大値 D を与える実効雨量は70mmである。なお計算は各計器ごとに行い、計算結果を地すべり地ごとに単純平均して表7、表8に示している。

地盤変位件数しきい実効雨量の計算は、以下のように行った。アメダス降雨データから、表1の地域内のアメダス観測点のいずれかで抽出条件20mm/日、50mm/日、70mm/日、100mm/日以上の日雨量のあった日(以下「降雨日」)を抽出した。降雨日以後集計期間5日間、10日間、15日間、30日間に地すべり地内で地盤日変位量0.1mm以上を記録した件数を地すべり地ごとに集計した。なお同じ地すべり地でも計器数が時期により変動するため、変位件数は、地盤日変位量0.1mm以上を記録したのべ件数を、集計期間中に観測を行っている計器数で除したものとした。地すべり地から直近のアメダス観測点における実効雨量を計算し、集計期間内の実効雨量最高日と変位件数をまとめた。「しきい件数」を1件、2件、3件、4件、5件とし、集計期間内の変位件数がしきい件数以上の場合と、集計期間内の変位件数がしきい件数未満の場合の度数を、実効雨量最高日の実効雨量1mmから300mmまで1mmごとに集計した。

地盤変位しきい実効雨量の計算と同様の方法により、各しきい件数に対する d の最大値 D を与える実効雨量をまとめた。 D を与える実効雨量を地盤変位件数しきい実効雨量とした。

水位上昇件数しきい実効雨量の計算は、孔内水位日上昇量0.1m以上を記録した件数を集計し、地盤変位件数しきい実効雨量と同様の方法により行った。

D が十分大きな値であるかを調べる、コルモゴロフ・スミルノフの1試料検定⁵⁾を有意水準5%で行った。検定の帰無仮説は、観測データにおける変化の分布関数と実効雨量の分布関数に違いがないというものである。 D と比較する検定量は変化の度数 n の平方根に反比例するので、観測データの数量が大きくなり、帰無仮説は棄却される。観測期間の長さが十分かどうかの検討をこの検定により行った。

6. 結果

表7から表11に計算結果を示す。

観測値と当日の実効雨量を対比する方法では、地区によってはかなり低いしきい実効雨量が計算される(表7~9)。

一方、降雨日以後集計期間内の変化件数と最高実効雨量を対比する方法では、全体としては100mm台後半より大きなしきい実効雨量が得られた(表10、11)。計算可能な地区の数は抽出条件により異なるが、20mm/日の降雨後30日間の変化件数と最高実効雨量を集計したケースでは比較的多くの地区について計算可能であった。このため20mm/日の降雨後30日間の集計結果のみを示す。

一例としてE地区の地盤変位件数しきい実効雨量と水位上昇件数しきい実効雨量を単純平均して得られる137mmを、図11にE地区SD-4地盤伸縮計累積変位、実効雨量とともに示す。実効雨量が概ね137mmを超えたとき地盤変位が観測される。

コルモゴロフ・スミルノフの1試料検定によると、計算されたしきい実効雨量のうち、 D が十分大きく有意とみなせるものの割合は、地すべり地により大きく異なる(表6)。すなわちいずれの地すべり地も同じ手順で観測データを処理したが、観測期間の違い、降雨と地すべり活動との関係の違いにより、有意なしきい実効雨量が得られやすい地すべり地とそうでない地すべり地があることを意味している。

また、しきい実効雨量の D の大小と D を与える実効雨量の大小には関係が認められなかった。すなわちしきい実効雨量が高いものでも、その「信頼性」が明らかに高いとは限らないことを意味している。さらに、 D と観測データ数にも関係が認められなかった。すなわち長期間観測を行っている地すべり地

表6 しきい実効雨量のうち有意なもの割合

	地盤変位しきい (全期間)	水位上昇しきい (全期間)	水位しきい (全期間)	地盤変位件数しきい (全期間)	水位上昇件数しきい (全期間)
A地区	20/51	24/127	29/35	30/79	15/66
B地区	22/27	15/15	16/18	18/71	0/56
C地区	24/64	24/25	36/41	30/80	12/68
D地区	16/25	15/16	30/41	0/74	10/76
E地区	15/20	31/38	46/56	2/59	6/56
F地区	5/23	19/35	32/46	0/44	0/32
G地区	n/a	1/3	3/4	n/a	0/45
H地区	5/8	13/15	15/17	1/58	0/50
I地区	18/26	23/24	26/29	47/74	17/58
J地区	14/21	10/15	15/17	1/49	1/55
K地区	n/a	14/15	15/20	n/a	11/64
L地区	0/4	13/18	21/28	0/64	12/55
M地区	0/3	31/41	27/50	3/72	17/54
N地区	1/1	18/22	27/28	42/76	17/63
O地区	56/111	102/122	93/197	5/56	17/64

に対し、今回設定した抽出条件では、観測データの変化の度数と実効雨量との関係を明瞭にできない場合があることを意味している。

7. 考察

7.1 地すべり警戒基準実効雨量の検討

今回の計算結果によると、しきい実効雨量が50mm以下のようなかなり低い値となるものもある。各地区で実効雨量が今回計算したしきい実効雨量の最低値を超えると即避難という考えでは、地区によっては年中避難し続けることになり、不合理である。実

効雨量が小さいときに地すべりの活動が皆無という意味ではないが、年間の警戒発令頻度を考慮すると、100mm 台後半以上の実効雨量基準で警戒するのが現実的である。

観測値と当日の実効雨量を対比する方法で低いしきい実効雨量が計算されるのは、図1、図4に示すように、今回扱った観測データの大部分がごくわずかな日変化量であることと、地すべりの活動が実効雨量に比例していない部分があることに由来する。観測値と当日の実効雨量を対比する方法は、警戒基準の観点からはあまりに安全側の値を出しがちと言

表7 地盤変位しきい実効雨量計算結果

期間 地盤変位	対策前			対策後			全期間		
	0.1mm/日	0.5mm/日	1.0mm/日	0.1mm/日	0.5mm/日	1.0mm/日	0.1mm/日	0.5mm/日	1.0mm/日
A地区	165	254	268	53	46	88	67	70	109
B地区	131	148	181	118	246	268	117	189	218
C地区	48	153	173	96	201	287	92	197	265
D地区	25	138	285	65	60	89	53	69	116
E地区	50	111	123	84	130	32	67	102	146
F地区	33	40	32	104	190	237	54	107	168
H地区	22	30	121	54	85	111	34	92	116
I地区	40	46	81	n/a	n/a	n/a	40	46	81
J地区	50	130	202	n/a	n/a	n/a	50	130	202
L地区	54	41	n/a	105	n/a	n/a	54	30	n/a
M地区	111	n/a	n/a	62	60	60	62	60	60
N地区	90	n/a	n/a	99	n/a	n/a	99	n/a	n/a
O地区	49	50	56	56	64	59	58	57	59
全体 (計器数)	57 (86基)	93 (69基)	130 (52基)	78 (143基)	108 (118基)	117 (71基)	69 (163基)	97 (126基)	124 (96基)

表8 水位上昇しきい実効雨量計算結果

期間 水位上昇	対策前			対策後			全期間		
	0.1m/日	0.5m/日	1.0m/日	0.1m/日	0.5m/日	1.0m/日	0.1m/日	0.5m/日	1.0m/日
A地区	74	93	118	96	116	147	68	87	110
B地区	53	69	136	53	83	136	106	130	175
C地区	64	86	109	64	95	125	86	120	135
D地区	64	88	n/a	11	n/a	n/a	79	100	n/a
E地区	60	77	116	57	85	115	51	70	104
F地区	75	130	180	65	57	72	181	220	222
G地区	71	91	n/a	n/a	n/a	n/a	71	91	n/a
H地区	25	49	85	25	28	48	52	65	87
I地区	51	71	96	51	71	96	n/a	n/a	n/a
J地区	54	86	135	20	50	29	76	87	135
K地区	71	78	98	n/a	n/a	n/a	71	78	98
L地区	80	75	76	81	80	88	61	76	80
M地区	99	141	132	114	276	n/a	97	131	132
N地区	71	98	140	66	124	179	70	115	110
O地区	65	92	93	55	65	70	71	99	105
全体 (計器数)	56 (99基)	77 (76基)	96 (67基)	84 (143基)	108 (123基)	122 (108基)	67 (163基)	94 (141基)	112 (127基)

水位しきい実効雨量計算結果

期間	対策前					対策後					全期間					
	最低水位との差	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m	5.0m	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m	5.0m	1.0m	2.0m	3.0m	4.0m	5.0m
A地区	84	112	79	91	n/a	86	134	102	112	128	86	129	98	109	128	
B地区	78	130	143	166	186	122	161	268	285	270	75	131	143	166	186	
C地区	60	66	61	76	138	113	112	140	190	236	63	76	104	133	158	
D地区	15	22	26	26	36	54	111	88	116	85	67	86	78	92	73	
E地区	64	96	119	111	61	51	59	134	114	166	53	69	124	113	141	
F地区	33	27	21	89	67	156	154	177	197	183	46	82	121	167	179	
G地区	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	42	45	45	45	n/a	42	45	45	45	n/a	
H地区	50	45	41	n/a	n/a	58	64	126	65	83	56	50	126	65	68	
I地区	48	71	92	118	97	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	48	71	92	118	97	
J地区	26	49	31	n/a	n/a	98	93	143	120	186	53	54	66	81	120	
K地区	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	45	74	119	89	191	45	74	119	89	191	
L地区	48	57	79	71	58	48	48	52	48	46	57	58	75	81	57	
M地区	103	203	n/a	n/a	n/a	84	70	86	99	94	85	81	86	99	94	
N地区	28	30	103	137	202	102	80	91	138	193	51	66	90	133	171	
O地区	36	38	44	59	63	45	51	44	60	58	48	53	44	54	56	
全体	43	59	67	81	85	72	80	94	105	109	58	73	85	94	97	
	(計器数)	(97基)	(80基)	(64基)	(55基)	(40基)	(136基)	(119基)	(106基)	(94基)	(78基)	(158基)	(142基)	(126基)	(113基)	(88基)

地盤変位件数しきい実効雨量計算結果

期間	対策前					対策後					全期間					
	地盤変位件数	1件	2件	3件	4件	5件	1件	2件	3件	4件	5件	1件	2件	3件	4件	5件
A地区	n/a	n/a	n/a	n/a	90	209	173	173	135	135	209	173	173	135	135	267
B地区	130	130	156	156	156	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	130	130	156	156	156	
C地区	190	190	125	246	246	95	146	92	77	n/a	123	146	155	293	293	
D地区	119	119	119	59	42	94	208	208	208	293	94	84	84	95	293	
E地区	n/a	n/a	n/a	n/a	133	n/a	n/a	98	98	98	n/a	n/a	146	146	133	
F地区	n/a	98	98	98	98	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	
G地区	n/a	123	123	123	123	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	116	181	74	74	
H地区	244	244	244	244	244	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	244	244	273	273	273	
I地区	n/a	265	265	104	104	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	265	265	104	104	
J地区	n/a	106	115	115	143	n/a	82	92	92	92	106	115	115	115	115	
K地区	184	184	198	198	198	145	183	183	191	251	145	184	198	198	251	
L地区	130	184	184	184	184	183	191	191	198	198	183	191	191	191	191	
M地区	n/a	n/a	175	175	175	n/a	n/a	n/a	n/a	97	n/a	n/a	182	182	97	
全体	158	165	164	155	149	169	182	166	161	182	169	176	185	173	195	
	(地区数)	(7地区)	(10地区)	(11地区)	(11地区)	(13地区)	(6地区)	(7地区)	(8地区)	(8地区)	(8地区)	(9地区)	(11地区)	(13地区)	(13地区)	(13地区)

水位上昇件数しきい実効雨量計算結果

期間	対策前					対策後					全期間					
	水位上昇件数	1件	2件	3件	4件	5件	1件	2件	3件	4件	5件	1件	2件	3件	4件	5件
A地区	192	192	192	192	181	109	118	128	133	267	109	109	133	133	267	
B地区	n/a	52	75	108	156	n/a	87	205	n/a	n/a	n/a	87	218	108	108	
C地区	n/a	191	191	198	241	84	91	116	241	241	84	91	125	198	241	
D地区	73	59	n/a	n/a	n/a	191	233	233	293	293	191	233	233	293	163	
E地区	43	49	123	123	123	292	292	292	292	292	63	91	114	114	114	
F地区	98	98	91	63	63	288	288	288	288	288	288	174	92	92	288	
G地区	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	130	134	134	239	134	130	134	134	239	134	
H地区	n/a	123	123	120	120	n/a	120	200	200	200	n/a	123	123	61	62	
I地区	61	120	131	131	131	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	61	129	131	131	131	
J地区	203	134	134	134	134	127	186	127	126	n/a	127	203	203	185	186	
K地区	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	147	147	191	191	270	147	147	191	191	270	
L地区	151	151	198	220	220	82	82	124	124	108	151	151	143	220	220	
M地区	130	182	184	254	254	151	151	156	270	270	151	151	156	270	270	
N地区	n/a	143	198	198	254	115	115	121	183	181	115	115	121	198	254	
O地区	127	185	275	275	138	97	146	165	165	165	127	185	127	166	283	
全体	120	129	160	168	168	151	156	177	211	226	152	140	148	173	199	
	(地区数)	(9地区)	(13地区)	(12地区)	(12地区)	(12地区)	(12地区)	(14地区)	(14地区)	(13地区)	(12地区)	(13地区)	(15地区)	(15地区)	(15地区)	(15地区)

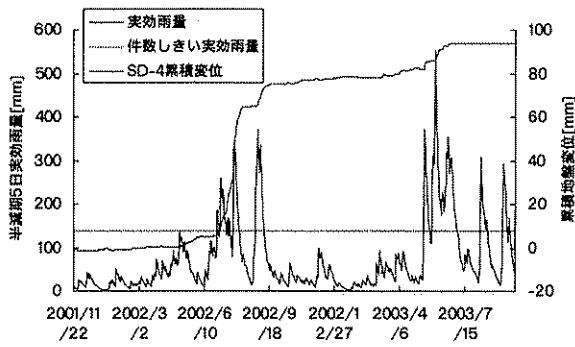


図11 E地区SD-4地盤伸縮計(01/11/23-03/9/30)の累積地盤変位と件数しきい実効雨量

える。

一方、降雨日以後集計期間内の変化件数と最高実効雨量を対比する方法は、全体としては100mm台後半より大きなしきい実効雨量が得られ、地すべりの観測データに基づいて降雨指標の警戒基準を設定する1手法の基本になりうると考える。

今回は抽出条件を各種設定し、地区ごとに各計器のしきい実効雨量を単純平均する方法と、地区ごとに変化のべ件数を集計する方法を用いた。計算方法はほかにもあるであろうが、最適な抽出条件設定や計算方法の選択は、地すべりの機構解明と並行して明らかになるべきものと考え。

7.2 対策工施工前後の観測データの比較

対策前と対策後の比較は、雨の降り方、観測態勢が共通していることが前提である。実際には、例えばA地区では、対策前に非常な豪雨があり、対策後に小崩壊部に地盤伸縮計を増設している。このような事情があるので、対策後のしきい実効雨量が対策前の値に比して低くても、斜面の耐降雨性が低下したことを意味するものではない。

また、水位しきい実効雨量、水位上昇しきい実効雨量、地盤変位件数しきい実効雨量、水位上昇件数しきい実効雨量とも対策前に比して対策後のほうが高い値となっている。対策前から長期間一定の観測態勢を継続すれば、観測データは、対策の実施により斜面の耐降雨性が向上したことを数値として示す可能性がある。

7.3 観測数量の検討

何日以上の観測を行えば、地すべり活動と降雨との関係を示す上で統計的に十分かという問題につい

て、コルモゴロフ・スミルノフの検定からは明らかにできなかった。例えば10年間の観測データを有する0地区でも、地盤変位件数しきい実効雨量の計算80ケースのうちDが有意となったのは5ケースにとどまった(表6)。すなわち、降雨によって生じた地すべり活動を多数記録していれば、Dは有意となるはずであるが、0地区では降雨によらないと判定される緩慢な動きが長年継続している。このように地すべり地により降雨と地すべり活動との関係が異なるため、観測が何日以上であれば十分と一概にいえないらしいことがわかった。

観測数量について今後検討するにあたっては、長期間観測を行っている地すべり地を対象とし、抽出条件を見直すこと、集水井内における流量観測などを追加して降雨と地すべり活動との関係のモデル化を試み、しきい実効雨量と対比することが有効と考える。

8. おわりに

ある雨量を境に地すべり活動が活発化するということを証明するのは必ずしも容易ではなく、これまで地すべりに関して実用的な降雨指標の警戒基準は存在しなかった。

これに対し、本調査の結果、長期間一定の観測態勢を継続すれば、地すべり活動や対策工の効果を、降雨量を指標として説明できる可能性があることがわかった。今後、観測の数量と整理の手法が改善されてゆくことが望まれる。

参考文献

- 1) 防災情報通信システム研究会編著：「防災情報通信システム 土砂災害から生命を守るために」、山海堂、2003
- 2) 綱木亮介・藤澤和範：「地すべりの警戒・避難基準の考え方」、土木技術資料、Vol. 41、No. 3、pp. 12-13、1999
- 3) 末峯 章：「地すべり発生時の地下水の観測事例」、第42回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp. 403-406、2003
- 4) 長谷川 隆・小野慎吾・松本 敏・細谷健介：「宇奈月ダム貯水池周辺斜面における計測管理の問題点と今後の展望(その2)」、ダム技術、No. 210、pp. 63-74、2005
- 5) 石居 進：「生物統計学入門」、培風館、1975