

アジア航測株式会社

○小川紀一朗

(財)砂防・地すべり技術センター

松村 和樹

建設省中部地方建設局

井良沢道也

1. はじめに

砂防計画を立案する上で、流域における土砂の生産状況を把握することは基本的な課題である。近年、災害事例に関する調査資料の蓄積、現場における土砂移動状況の観測ならびに室内実験の発展に伴い、流出する土砂の形態や量に関しては比較的明確に把握することができるようになってきたが、斜面および渓床に存在する不安定土砂の河道への流入に関しては、現在のところ質的量的にも未解明の部分が多い。したがって、山地の上流域における土砂生産現象を把握することは、砂防計画を策定する上で急務となっている。そこで、筆者らは土砂生産モデルを作成し、実際現象と比較検討を行うことによって、土砂生産現象を把握することを試みた。

2. 研究方法

土砂生産現象を把握する上で、土砂生産の形態区分と土砂生産の場を明らかにすることは重要である。土砂生産の形態としては、表層崩壊（山腹崩壊）、渓岸崩壊、土石流、地すべり、大規模崩壊に区分することができる。これらの土砂生産現象の発生する場は、地質ならびに地質構造上脆弱な場に対応すると考えられ、地形分類を行うことによって生産の場を抽出することが可能となる。本検討では、土砂生産現象を発生させる誘因の中で最も重要なものは降雨であり、降雨により発生する代表的な土砂生産の形態は表層崩壊であるため、表層崩壊に注目して土砂生産現象を把握することを試みた。

崩壊の発生予測に関する研究は、理論的、現象論的方法により数多くの報告がなされているが、ほとんどの報告が統計学的手法を用いたものであり、流域全体を総合的に取扱ったものである。したがって、降雨と崩壊発生との関連性は明確ではなく、平均的確率的に理解する傾向が強い。また、個々の斜面における崩壊の発生、非発生についての検討を避けていたため、時間軸を考慮した崩壊発生に関する検討もなされなかった。

表層崩壊は、降雨に伴い斜面表層土層中の地下水位が上昇し、土塊の安定性が失われて表層土が滑落する物理現象である。山地流域における土砂の生産・流出現象を把握する上で、崩壊発生の時間と場所と量を明確にすることは重要な課題となっているため、土砂生産モデルとしては、崩壊の発生、非発生について個々の斜面を対象として検討を行い、崩壊の発生状況を時間的空間的に把握できるものが必要となる。したがって、今回検討する土砂生産モデルとしては、降雨、浸透、斜面安定を組み合わせた物理モデルを用いるものとした。

調査対象地は、我国有数の荒廃河川である天竜川水系小波川および三峰川である。調査を行うにあたり、流域の代表地質等を十分に考慮してモデル流域を5流域抽出した（図-1）。小波川および三峰川流域は、南北に中央構造線をはじめとして、仏像構造線、戸台構造線が発達し、これらの構造線を境界として西側から嶺家帯（花崗岩類、変成岩類）、三波川帯（結晶片岩、緑色岩、黒色片岩）、秩父帯（古生層）、四万十

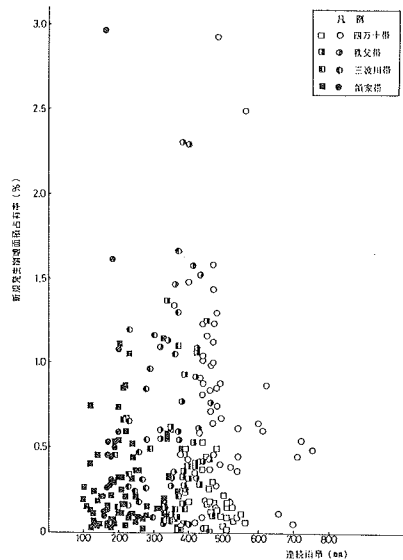
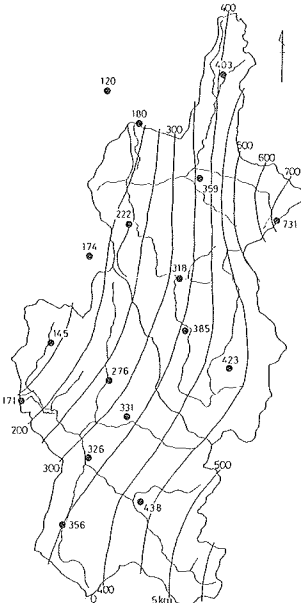
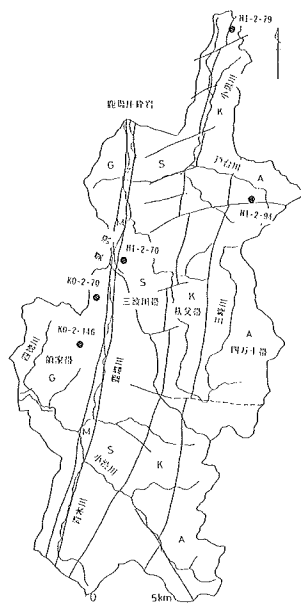


図-3 降雨と新規発生崩壊面積占有率

図-1 地質区分とサンプル流域の位置 図-2 等雨量線図(昭和57年台風10号, 連続雨量)

表-1 崩壊地諸元表

地質	流域面積 A (km ²)	新規					拡大					合計				
		CA (100m ²)	CN (ヶ)	CA/A (%)	CN/A (ヶ/km ²)	CA/CN (100m ² /ヶ)	CA (100m ²)	CN (ヶ)	CA/A (%)	CN/A (ヶ/km ²)	CA/CN (100m ² /ヶ)	CA (100m ²)	CN (ヶ)	CA/A (%)	CN/A (ヶ/km ²)	CA/CN (100m ² /ヶ)
小波川																
1	44.72	873.00	262	0.15	5.86	2.57	5141.50	415	1.15	9.28	12.39	5814.50	677	1.30	15.14	8.59
2	29.90	1076.90	274	0.36	9.16	3.93	1125.80	116	0.38	3.88	9.71	2202.70	390	0.74	13.04	5.65
3	42.93	796.90	339	0.19	7.90	2.35	1082.90	143	0.25	3.33	7.57	1879.80	482	0.44	11.23	3.90
4	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
5	54.99	1539.50	661	0.28	12.02	2.33	906.50	265	0.16	4.82	3.42	2446.00	926	0.44	16.84	2.64
㍻	172.54	4086.30	1536	0.24	8.90	2.66	8256.70	939	0.48	5.44	8.79	12343.00	2475	0.72	14.34	4.99
三波川																
1	81.68	6023.10	880	0.74	10.77	6.84	1913.90	162	0.23	1.98	11.81	7937.00	1042	0.97	12.76	7.62
2	55.60	3757.90	646	0.68	11.62	5.82	239.00	28	0.04	0.50	8.54	3996.90	674	0.72	12.12	5.93
3	35.39	1805.70	428	0.51	12.09	4.22	147.30	14	0.04	0.40	10.52	1953.00	442	0.55	12.49	4.42
4	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
5	16.07	776.50	130	0.48	8.09	5.97	0.00	0	0.00	0.00	0.00	776.50	130	0.48	8.09	5.97
㍻	188.74	12363.20	2084	0.66	11.04	5.93	2300.20	204	0.12	1.08	11.28	14663.40	2288	0.78	12.12	6.41
合計																
1	126.40	6696.10	1142	0.53	9.03	5.86	7055.40	577	0.56	4.56	12.23	13751.50	1719	1.09	13.60	8.00
2	85.50	4834.80	920	0.57	10.76	5.26	1364.80	144	0.16	1.68	9.48	6199.60	1064	0.73	12.44	5.83
3	78.32	2602.60	767	0.33	9.79	3.39	1230.20	157	0.16	2.00	7.84	3832.80	924	0.49	11.80	4.15
4	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00	0.00
5	71.06	2316.00	791	0.33	11.13	2.93	906.50	265	0.13	3.73	3.42	3222.50	1056	0.45	14.86	3.05
㍻	361.28	16449.50	3620	0.46	10.02	4.54	10556.90	1143	0.29	3.16	9.24	27006.40	4763	0.75	13.18	5.67

凡例

1: 四方十帯 2: 秩父帯 3: 三波川帯 4: 鹿嶋圧砕岩 5: 領家帯

帯(中生層)と地質が異なっている。このため、斜面地形もこのような地質ならびに地質構造により強く影響を受けて形成されており、土砂の生産形態も差異がみられる。

3. 土砂生産の実態

調査対象とした土砂生産は、昭和57年(1982年)の豪雨である。本流域は昭和57年7月から9月にかけて台風10号、台風18号の到来に伴う豪雨のため、多量の土砂が生産され、流出した。とくに台風10号の影響による7月31日~8月4日までの連続雨量は、南アルプス山岳地帯を中心に500mm~700mmにも達しており(図-2)、本流域上流域一帯を中心として多数の崩壊が発生した。

本流域における崩壊状況をまとめると表-1のようになる。これによれば、新規拡大崩壊面積率は、四方十帯で1.09%, 秩父帯で0.73%, 三波川帯で0.49%, 領家帯で0.45%となり、崩壊1個あたりの面

積についても、四万十帯、秩父帯、三波川帯、領家帯の順に小さくなっている。これは、降雨の分布状況に加えて、地質および地質構造による影響も強く受けているものと考えられる。また、小渋川と三峰川とでは、三峰川の方が一般的に崩壊面積は大きくなっている。一方、図-3には降雨と新規発生崩壊面積占有率との関係を示したが、明確な対応関係は読みとれず、サンプルは分散しているのがわかる。

4. 土砂生産モデルの作成

本検討で作成したモデルは、土砂生産の場として地中に浸透した降雨が集中しやすいと考えられる凹型斜面を、単位斜面として抽出し(図-4)、個々の斜面を対象として浸透流解析、斜面安定解析を行うことによって崩壊の発生、非発生を判定するものである(図-5)。

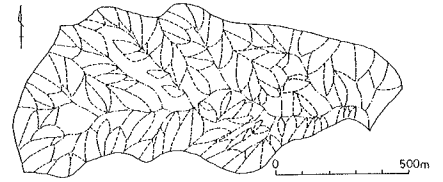
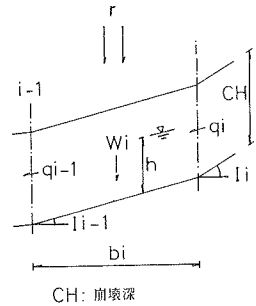


図-4 斜面分割図 (K0-2-70)



CH: 加壊深
図-5 モデルの概要

(a) 浸透流解析は、鉛直一次元飽和浸透流解析を用いた。

$$\lambda \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad \dots \dots (1)$$

$$q = h \cdot ks \cdot I \quad \dots \dots (2)$$

ここに、 h : 見かけの浸透水位 (m), I : 動水勾配, q : 単位時間単位幅流量 (m^3 / hr), r : 有効雨量強度 (mm / h), ks : 透水係数 (m / h), λ : 有効間隙率である。

(b) 安定解析はヤンプ法を用いた。

$$FS = f_0 \cdot \frac{\sum [C' bi + (\Delta Wi - u bi) \tan \phi']}{\sum \Delta Wi \cdot \tan li [\cos li (1 + \tan li \cdot \tan \phi' / FS)]} \quad \dots \dots (3)$$

ここに、 Wi : すべり面上の土塊重量、 bi : すべり面の長さ、 li : すべり面の傾斜角、 u : すべり面上の間隙水圧、 C' : 粘着力、 ϕ' : 内部摩擦角、 f_0 : 補正係数 (1.0) である。

(c) 表層土層厚は崩壊深に等しいと仮定した。崩壊深は昭和57年災害の実績値をもとに地質別に設定した。

(d) 透水係数は、砂、シルト質を想定して 10^{-3} (cm / sec) (0.036 (m / h)) 程度の値をもとに、全体斜面のうち50%程度の斜面が飽和するような値を設定した。

(e) 粘着力は崩壊の発生、非発生の状況に合わせて変動させるものとした。

(f) 内部摩擦角は表層土層の含水状態に応じて変動することが考えられるが、本モデルでは 30° で一定とした。

表-2 崩壊発生の実績と計算の比較

流域番号	H1-2-94	H1-2-79	H1-2-70	K0-2-70	K0-2-146	
流域面積	1.53 (km ²)	2.16	0.88	0.74	0.99	
地 質	四万十帯	秩父帯	三波川帯	鹿嶋圧砂質, 領家帯		
崩壊面積率	0.64 (%)	1.58	1.19	1.10	0.59	
斜面数	104	104	74	197	63	
計算条件	粘着力	1.50 (t/m ²)	1.02	1.02	0.82	
	透水係数	0.054 (m/s)	0.014	0.054	0.054	
	崩壊深	1.4 (m)	1.3	1.3	1.0	
適合斜面	発 生	3	24	3	16	5
	非 発 生	61	39	43	68	45
	計	64	63	46	84	50
適合割合	発 → 非	19	25	17	20	11
	非 → 発	21	16	11	3	19
	計	40	41	28	23	30
的中率	62 (%)	61	62	79	63	

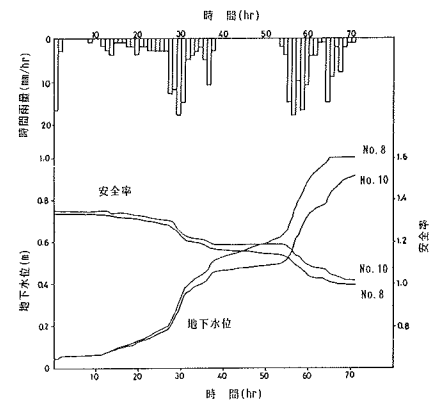


図-6 降雨と地下水位, 安全率 (K0-2-70)

(g) 土の単位体積重量は、土粒子の比重を2.60、間隙率を0.35とした場合の値を用いた。

5. 土砂生産シミュレーション

以上のモデルを用いて土砂生産シミュレーションを行った。計算の結果を崩壊発生の実績と比較すると表-2のようになる。これによれば、的中率は61%~79%であり、平均的には65%程度となる。ここで、的中率は実績と計算での崩壊の発生、非発生の状況が適合した斜面の、全体斜面に対する比率で求められる。

また、図-6は降雨と地下水位、安全率の関係を示したものである。ここで、No.8は崩壊発生斜面であり、No.10は非発生斜面である。これによれば、降雨とともに地下水位が上昇し、それに伴って安全率が低下する状況が表現されている。また、図-6より降雨との関係から崩壊発生時刻が求められるが、崩壊の発生時刻は降雨終了直前である場合が多いと考えられるため、実際現象における崩壊発生時刻との整合性に関する検討が必要である。

図-7は地下水位の10時間ごとの上昇状況と崩壊の発生位置を示したものであるが、地下水位の上昇状況が斜面傾斜の変化に対応している状況が表われている。また、崩壊の発生位置についてみると、実績、計算ともに斜面脚部の急傾斜地に対応しているのがわかる。

6. おわりに

本検討で作成した土砂生産モデルは、降雨、浸透、斜面安定解析を組み合わせた物理モデルである。したがって、本モデルを合理的に用いるためには、基本的に表層土層の厚さ、ならびに想定される破壊面の位置を正確に推定し、さらに土層の持つ各種の土質特性を把握する必要がある。しかし、透水係数、内部摩擦角、粘着力等の土質特性は同一斜面においても斜面上に存在する表層土層の形成履歴、構成物質、構成形態ならびに被覆植生の状況によって変化するため、実際にはそれらの状況を把握することは困難である。

一方、崩壊現象を実際現象と比較検討を行う場合、発生、非発生の状況から帰納的に土質条件を推定することができる。本モデルの場合、粘着力を変動させることによって実績値との対応をはかり、帰納的に値を推定している。したがって、設定した粘着力は純粋な土塊の粘着力とは意味が異なり、たとえば植物の根系による緊迫力等の要因を含んだ、流域斜面の強度指數的な意味が強くなると考えられる。すなわち、本モデルで設定された各定数は、土質定数というよりも、斜面の土砂生産ポテンシャルを表現した数値として理解する方が妥当と考えられる。

以上のように、降雨、浸透、斜面安定解析を組み合わせた土砂生産モデルを作成し、山地流域における土砂生産過程について実際現象との比較検討を行った結果、実際の崩壊発生、非発生との対応がうまく把握の事ができた。そして、降雨に伴う地下水位の上昇と安全率の低下の状況が表現でき、崩壊の発生する時間、位置、量についても明確にすることができた。今後は、本モデルと土砂流出モデルと結合させ、流域における土砂移動現象を総合的に把握することが課題となる。

I	斜面勾配 (°)	浸透水位 (m)	浸透流量 (m ³ /h)	地下水位 (m)	岩盤標高 (m)
9	0.00	0.636	0.000	1449.64	1449.00
8	32.33	0.835	0.028	1439.83	1439.00
7	22.79	0.620	0.014	1429.62	1429.00
6	42.27	0.712	0.035	1419.71	1419.00
5	44.72	0.930	0.049	1409.93	1409.00
4	44.43	0.381	0.021	1399.38	1399.00
3	53.87	0.898	0.066	1389.90	1389.00
2	49.30	0.846	0.053	1379.85	1379.00
1	38.66	1.000	0.043	1370.00	1369.00

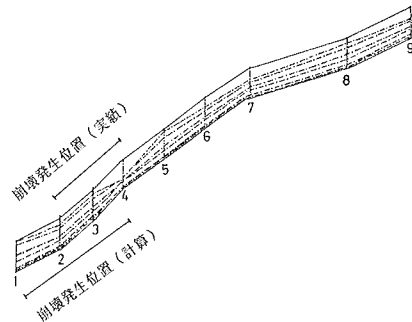


図-7 地下水位の上昇と崩壊発生位置
(K0-2-70 No.8)