

13 土質条件を考慮した表層崩壊現象に関する考察

アジア航測株式会社

○小川紀一朗 鈴木 隆司

(財)砂防・地すべり技術センター

松村 和樹 菊井 稔宏

建設省天竜川上流工事事務所

後藤 宏二

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。とくに、豪雨により発生する表層崩壊については、下流域に与える影響は極めて大きいにもかかわらず現在のところ質的量的に未解明の部分が多いため、このような山地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。このため、これまで筆者らは豪雨により発生する表層崩壊に注目した土砂生産モデルを作成し、サンプル流域を対象として実際現象との比較検討を行ってきた⁽¹⁾。本検討では、より合理的な砂防計画を立案することを目的として、現場における土質調査を行い、流域全体における表層崩壊現象を把握することを試みた。

2. 土砂生産モデル

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。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、土壌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。この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。すなわち、本モデルでは土砂生産の場として単位斜面を抽出し、個々の斜面を対象とした浸透流解析、斜面安定解析を行うことによって、崩壊の発生・非発生を把握するモデルである⁽¹⁾。

◎浸透流解析：崩壊を発生させる原因としては降雨が挙げられるが、直接的に斜面表層土層の安定度を低下させるものは、降雨に伴う表層土層内の浸透流の発生とそれに伴う地下水位の上昇である。そこで、本モデルでは降雨に伴い地下水位の上昇を把握するために鉛直一次元飽和浸透流解析を行った(図-1)。本モデルで用いた表層土層内の浸透流解析モデルは連続の式とDarcy式よりなる。

$$\text{連続の式} \quad \lambda \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = r \quad (1)$$

$$\text{Darcy 式} \quad q = h \cdot k_s \cdot I \quad (2)$$

ここに、 h ：見かけの浸透水位、 I ：動水勾配、 q ：単位時間単位幅流量、 r ：有効雨量強度、 k_s ：透水係数、 λ ：有効間隙率である。

このうち、有効降雨の推定については、山地流域

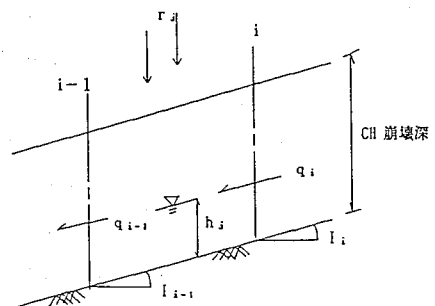


図-1 浸透流解析の概要

を対象とした流出率と累加雨量との関係式を用いて算出するものとした。

$$f = 1 - 17.9Rt^{0.75} \quad (3)$$

ここに、 f ：流出率、 Rt ：累加雨量である。

◎斜面安定解析：斜面の表層土ブロックの斜面安

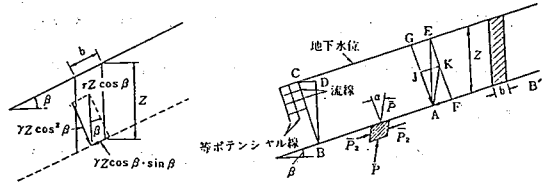


図-2 斜面安定解析の概要

定計算を行う場合、各ブロック間に作用する荷重を考慮するならば、スライスによるすべり面に適用した手法であるヤンプ法を用いることが多い。しかし、表層崩壊の場合、すべり面に比較して崩壊深が非常に小さく、表層土層と基盤岩との境界面が潜在的な破壊面になると考えられることから、各ブロック間に作用する荷重をある程度無視して考えることができる。そこで、本検討では各表層土ブロックについて次のような平面すべりの式を用いるものとした(図-2)。

$$Fs = \frac{C' + [\gamma H_1 + \gamma' (z - H_1)] \cos^2 \beta \cdot \sin \phi'}{[\gamma H_1 + \gamma' t (z - H_1)] \cos \beta \cdot \sin \beta} \quad (4)$$

ここに、 γ 、 γt 、 γ' ：土の湿潤、飽和、水中単位体積重量、 c' ：粘着力、 ϕ' ：内部摩擦角である。

安定解析は各ブロックごとに行い、最も低い安全率を計算斜面の安全率として、安全率1未満を崩壊斜面、1以上を非崩壊斜面とした。

3. 土砂生産状況

調査対象地は、我国有数の荒廃河川である天竜川水系太田切川である。太田切川は木曾駒ヶ岳を源とする、流域面積61.5km²、平均河床勾配1/17の急流河川である。本流域の地質は領家花崗岩および領家変成岩類で構成されている。本流域では、昭和57年台風10号に伴う豪雨により多数の崩壊が発生した。太田切観測所における7月31日～8月4日までの連続雨量は207mm、最大時間雨量は15.5mmが記録されている。

◎崩壊面積：昭和57年台風10号時に発生した崩壊面積を集計すると表-1⁽²⁾のようになる。これによれば、昭和57年台風10号時に発生した新規・拡大崩壊の面積占有率は0.58%になる。また、新規・拡大崩壊の平均面積は224 m²となる。

表-1 崩壊面積集計表

◎崩壊深：表層崩壊は一般に表層土層と基盤岩との境界面において発生する例が多いため、本検討でも表層より崩壊深分だけ低い位置に基盤岩が存在するものと仮定した。昭和57年台風10号時に発生した崩壊の崩壊深をまとめると表-2⁽²⁾のようになる。このデータをもとに土砂生産シミュレーションを行う上での崩壊深を設定すると1.2 mとなる。

A (km ²)	崩壊種類	CA (100m ²)	CN (ヶ)	CA/A (%)	CN/A (ヶ/km ²)	CA/CN (100d/kd)
29.3	新規	628.6	191	0.21	6.53	3.29
	拡大	1065.7	565	0.36	19.30	1.89
	合計	1694.3	756	0.58	25.83	2.24

A：2次谷流域面積 CA：崩壊面積 CN：崩壊個数

表-2 崩壊深の設定

崩壊地の面積 (m ²)	～ 399	400～599	600～999	1000～1999	2000～
平均崩壊深 (m)	1.0	1.2	1.3	1.8	1.9

◎崩壊生産土砂量：昭和57年台風10号時に発生した崩壊生産土砂量を集計すると表-3⁽²⁾のようになる。これによれば、本流域における新規・拡大崩壊生産土砂量は266,600m³となる。

表-3 崩壊生産土砂量集計表

4. 土質条件の設定

土砂生産シミュレーションを行うにあたり、各種の土質条件を設定する必要がある。本検討で用いたモデ

単位：m ³								
新規・拡大崩壊			継続崩壊			合計		
崩壊土量	残土量	生産土量	崩壊土量	残土量	生産土量	崩壊土量	残土量	生産土量
372.4	105.8	266.6	29.0	8.2	20.8	401.4	114.0	287.4

ルは物理モデルであるため、現地斜面における透水係数、粘着力、内部摩擦角、土の単位体積重量、間隙率が必要となる。このため、これらの資料を得るために現場一面せん断試験、透水試験、密度試験、比重試験、含水量試験を行った。試験を行った場所は図-3に示すとおりである。試験は本流域中・下流域において6ヶ所行った。調査の結果は表-4に示した。調査の方法、結果、考察を整理すると次のようになる。

◎現場一面せん断試験：試験は（株）マルイ製の現場一面せん断試験機 MIS-233-7を用いて行った。本装置は斜面表層土サンプルを不攪乱にて現場で採取し、その場で圧密をした後に一面せん断試験をするもので、せん断時には試料は飽和状態で行った。試験の結果を見ると、せん断応力のピークは明瞭には表れなかった（図-4）。試験後のせん断面は不明瞭であり、実際のせん断面は一面ではなく数面にもなっているように思われる。また、供試体内にはφ1～2mmの根が数本、φ2～3cmの礫が数個含まれることがあった。花崗岩地帯の崩壊斜面において測定された例として粘着力は $0.3 \sim 0.5 \text{ t/m}^2$ 、内部摩擦角は $20 \sim 50^\circ$ という成果⁽³⁾がある。本調査の場合では粘着力は $0.1 \sim 0.6 \text{ t/m}^2$ 、内部摩擦角は $11 \sim 25^\circ$ となっている。本地域の場合ではそれぞれの値が多少小さめに出ているが、値のばらつきについては供試体の採取方法、根系、礫の混入等が大きく影響を与えていると考えられる。

◎透水試験：透水試験は当初現場定水位透水試験を行ったが、斜面表層土層の透水係数が非常に高いため水位を維持することができず断念した。そこで、斜面表層土を不攪乱にて採取したサンプルを用いた室内定水位透水試験を行った。表-4によれば、透水係数は $3.66 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 1.11 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ と分散しており、平均では 10^{-2} cm/s オーダーである。この値は非常に高いものであり、非常に透水性が良いことを示している。

◎比重試験：表-4によれば、土粒子の比重は $2.54 \sim 2.76$ となり平均で 2.63 となる。

◎密度試験・含水量試験：表-4によれば、自然状態での含水比は $13.8 \sim 38.6\%$ 、湿潤密度は $1.11 \sim 1.66 \text{ g/cm}^3$ 、間隙比は $0.89 \sim 1.45$ 、飽和度は $28.3 \sim 88.9\%$ となっている。これらの値をもとに間隙率、乾燥密度、飽和密度、水中密度を算出した。これによれば、間隙率は $47 \sim 59\%$ 、飽和密度は $1.64 \sim 1.87 \text{ t/m}^3$ 、水中密

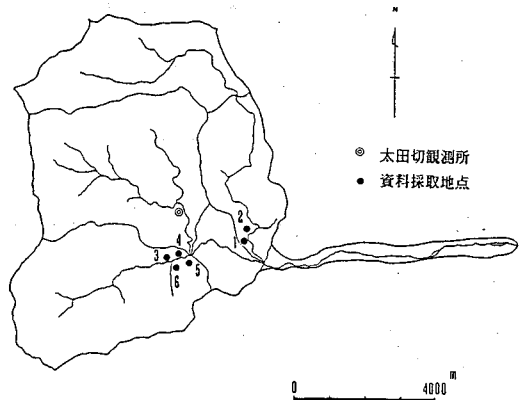


図-3 土質調査調査位置図

表-4 土質試験結果一覧表

試料番号	1	2	3	4	5	6
深さ m	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5
砂分(2mm-) %		45		8		55
砂分(0.074-) %		33		80		29
シルト(0.005-) %		17		8		12
粘土(>0.005) %		5		4		4
最大粒径 mm		50.8		9.52		38.1
均等係数		253.3		12.6		229.4
分類		Gf		S-F		Gf
土粒子の比重	2.54	2.58	2.76	2.69	2.57	2.64
含水比 %	21.1	23.1	14.0	13.8	38.6	23.6
自然湿潤密度 g/cm³	1.25-1.26	0.99-1.23	1.33-1.39	1.44-1.48	1.62-1.68	1.57-1.73
間隙比	1.41	1.45	1.37	1.11	1.12	0.89
飽和度 %	37.4	37.4	28.3	33.5	88.9	70.4
力学特性						
粘着力 t/m²	0.035	0.135	0.50	0.50	0.39	0.57
内部摩擦角 度	11.5	2.5	14	57	13	25
透水係数 10^{-2} cm/s	0.365	3.29	11.1	2.03	0.569	4.04
間隙率 %	58.4	59.2	57.7	52.7	52.7	47.0
飽和密度 g/cm³	1.64	1.65	1.75	1.80	1.74	1.87
水中密度 g/cm³	0.64	0.65	0.75	0.80	0.74	0.90

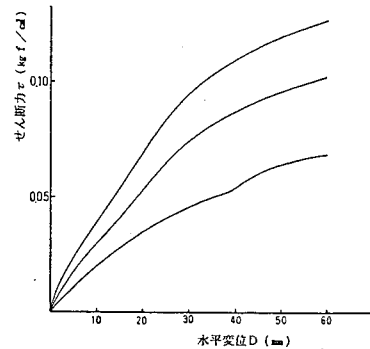


図-4 水平変位とせん断応力

度は0.64~0.90 t/m³となる。

◎土質定数の設定：以上の調査結果から土砂生産シミュレーションに必要な土質定数を設定すると表-5のようになる。ここで、粘着力は植物の根系の影響等が考えられるため、コントロールパラメータとした。

5. 土砂生産シミュレーション

以上のように設定した諸条件をもとに土砂生産シミュレーションを行った。崩壊発生の実績と計算の比較を表-6に示した。これによれば、的中率は33~88%であり平均では59%という結果が得られた。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。次に、地下水の縦断的な上昇状況ならびに斜面各部の地下水位の上昇状況と安全率の低下状況を、崩壊の発生斜面について示すと図-5のようになる。これによれば、地下水位の上昇はさほど極端ではなく、比較的小さい。また、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。一方、シミュレーション計算の結果、生産土砂量の実績値と計算値を比較すると図-6のようになる。また、本流域における崩壊生産土砂量は358,600m³であり、実績との対応は良好なものとなる。

6. おわりに

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することができた。今後は、集中的な現地観測ならびに実験等を行うことによりモデルの精度を高め、砂防計画論上での確立をはかることが課題となる。

7. 参考文献

- (1) 小川ほか：天竜川上流における表層崩壊の実態と解析 昭和62年度砂防学会研究発表会概要集
- (2) 天竜川上流工事事務所：昭和60年度小渋川・太田切川土砂動態調査
- (3) 丸井：自然斜面における表層崩壊の研究

表-5 土質定数一覧表

粘着力	1.55 t/m ²	水中単位体積重量	0.7 t/m ³
内部摩擦角	20°	透水係数	0.36m/h(10 ⁻² cm/s)
湿潤単位体積重量	1.4 t/m ³	間隙率	0.55
飽和単位体積重量	1.7 t/m ³	真比重	2.63

表-6 土砂生産シミュレーション計算結果

流域番号	流域面積 km ²	崩壊面積 占有率%	的中率 %	流域番号	流域面積 km ²	崩壊面積 占有率%	的中率 %
2-1	3.56	0.93	54	2-21	0.72	0.34	88
2-2	2.27	1.05	50	3-1-1	1.28	0.53	68
2-3	1.86	0.96	57	3-1-2	1.36	0.63	61
2-4	0.70	1.28	43	3-2-1	0.80	0.50	68
2-5	0.76	1.18	56	3-2-2	1.62	0.48	68
2-6	0.54	0.54	33	3-3-1	1.55	1.30	41
2-7	2.01	0.29	67	3-3-2	1.87	0.81	58
2-8	2.79	1.36	53	3-3-3	0.54	0.66	69
2-9	0.52	1.90	34	3-4-1	2.90	0.36	60
2-10	2.09	1.00	56	3-4-2	3.79	0.43	58
2-11	0.95	1.30	55	3-4-3	3.07	0.59	61
2-12	1.35	1.13	57	3-4-4	2.22	0.49	57
2-13	1.39	1.19	51	3-4-5	0.80	0.25	85
2-14	0.82	1.45	33	4-1-1	2.02	0.49	73
2-15	1.88	0.60	57	4-1-2	0.80	0.62	53
2-16	0.51	1.01	60	4-1-3	2.36	0.70	64
2-17	2.72	0.35	70	4-1-4	0.78	—	—
2-18	0.37	0.36	71	4-1-5	0.64	—	—
2-19	2.08	0.17	84	4-1-6	0.41	—	—
2-20	1.13	0.52	67	合計	61.50	0.68	59

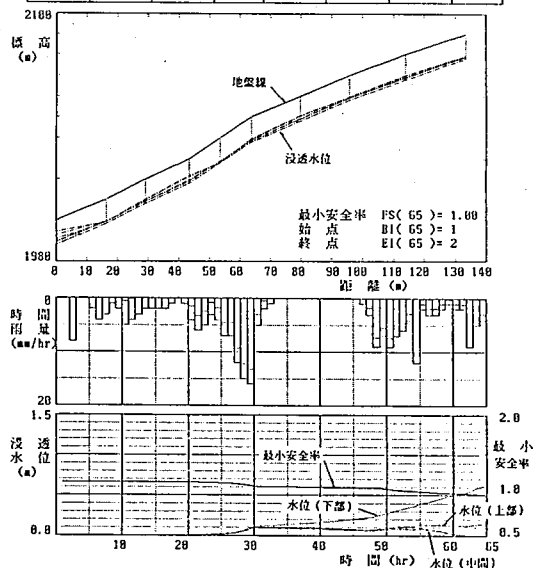


図-5 降雨と地下水位および最小安全率

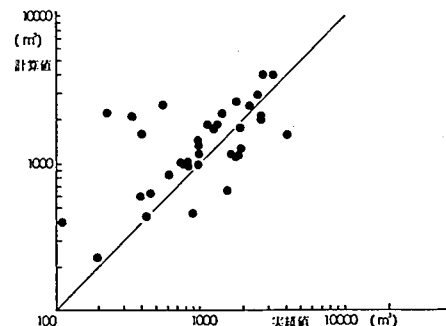


図-6 生産土砂量の実績値と計算値