

Title	砂防ダムを有する山地河川の土砂流出特性
Author(s)	本田, 尚正
Editor(s)	
Citation	大阪府立工業高等専門学校研究紀要, 1996, 30, p.59-64
Issue Date	1996-06-30
URL	http://hdl.handle.net/10466/13472
Rights	

砂防ダムを有する山地河川の土砂流出特性

本田 尚正*

Characteristics of Sediment Runoff in Mountain Rivers with Sabo Dams

Naomasa HONDA*

ABSTRACT

Numerous landslides took place due to the earthquake of southern Hyogo, Jan. 17, 1995, and produced much unstable sediment in drainage basin. Such deposited sediment in steep area is supposed to be eroded and transported as debris flows when it rains severely. The countermeasures against debris flow hazards, therefore are indispensable, and in fact sabo works such as debris control dams have been constructed.

This paper deals with a method to predict characteristics of sediment runoff, such as flow discharge, flow velocity, sediment concentration in mountain rivers with sabo dams. Sumiyoshi river, which drain part of Mt. Rokko area and runs through central Kobe, is chosen for discussions. Therein, several sabo dams have been constructed in the steep area.

Numerical analysis is conducted under several, actual conditions in order to investigate the changes of debris flow characteristics through the reach with sabo dams. According to the numerical results, flow discharge and sediment discharge of debris flow show a sudden decrease at the cross section with sabo dams even if the dam area is filled up of sediment, when the sediment transport mode changes from debris flow into general contact loads.

Keywords: Sediment Erosion, Sediment Runoff, Debris Flow, Sabo Dam

1. 緒言

急傾斜地や山地河川流域では、地すべりや山腹崩壊などによって土砂生産が活発に行われている。これらの崩土は、降雨などの水の供給を受けて、土石流あるいは土砂流となって流出し、各種の土砂災害をひき起こすだけでなく、自然環境の変化をもたらす。そのため、これらの流域では、流路工や砂防ダムなど各種の土砂流出のコントロールが行われている。

ところで、土砂流出の形態は、土砂生産の発生する場所とその下流域の地形的条件（河床勾配、河幅、流路の蛇行の状況など）、生産土砂の特性（土質、粒度分布、崩壊の状況など）および水の供給条件（降雨、融雪、地下水など）に依存する。たとえば、勾配が10

数度の場合には土石流が形成され、勾配が緩くなるに伴って、掃流状集合流動を経て、掃流砂を伴う流れが形成される。また、砂防ダムの堆砂域は河幅が広く、溪床勾配も緩やかであることから、土砂の堆積が進み、土砂流出をコントロールする。

こういった流砂形態については、洪水・土砂災害に関連する基礎および応用研究^{1)~6)}の中で議論され、これまでに数多くの成果が得られている。しかし、実際の現象を対象とした研究は少なく、これまでに蓄積された基礎研究の成果を用いて、実際の土砂流出現象をどの程度再現できるかを検討することは、土砂災害対策を立案する上で重要な課題の一つである。

これより、本研究では、六甲山系住吉川を事例として、堆積土砂の二次侵食による土砂流出を想定して数値シミュレーションを行い、勾配や河幅が不規則に変化する山地河川の土砂流出特性を明らかにする。さらに、土石流の形成・流動・堆積過程における砂防ダムの土石流調節効果について考察する。

1996年4月10日受理

*建設工学科 (Department of Civil Engineering)

本論文は、平成8年度土木学会関西支部年次学術講演会における文献^{7), 8)}を再検討し、まとめ直したものである。

2. 一次元支配方程式

土石流の面的な分布を議論する必要のある場合には、二次元的な支配方程式が用いられ、土石流の挙動が河道に沿う議論で十分な場合には、一次元支配方程式が用いられる。ここでは、山地河道における土砂流出を対象としているので、江頭・芦田らによる一次元支配方程式^{4),6)}を用いることとすれば、水と砂礫に関する質量保存則は、次式で与えられる。

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial U h B}{\partial x} = \frac{E}{c_*} \quad (1)$$

$$\frac{\partial c h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial c U h B}{\partial x} = E \quad (2)$$

ここに、 t は時間、 x は流れに沿う座標、 h は流動深、 B は河幅、 U は断面平均流速、 E は侵食速度 ($E < 0$ のときは堆積)、 c は土石流の土粒子体積濃度、 c_* は静止堆積層の土砂体積濃度である。なお、ここで、砂礫の侵食・堆積の際には、水も同時に取り込んだり、放出したりするものとする。

つぎに、運動量保存則は次式で与えられる。

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} = g \sin \theta_x - \frac{1}{\rho_m} \frac{1}{B h} \frac{\partial B P}{\partial x} - \frac{U E}{c_* h} - \frac{\tau_b}{\rho_m h} \quad (3)$$

$$\rho_m = (\sigma - \rho) c + \rho \quad (4)$$

ここに、 g は重力加速度、 θ_x は x となす角度で、河床勾配に相当する。 Z_b は静止堆積層と流動層との境界で、河床高に相当する。 ρ_m は水と砂礫の混合物の密度、 σ は砂礫の密度、 ρ は水の密度、 P は河床にかかる圧力、 τ_b は河床せん断力である。

なお、崩壊土砂や土石流の運動は、侵食・堆積に伴う河床勾配の変化による影響を受ける。したがって、土砂の移動開始から停止までの過程を追跡するためには河床変動式が必要であり、これは次式で与えられる。

$$\frac{\partial Z_b}{\partial t} = - \frac{E}{c_* \cos \theta_x} \quad (5)$$

$$\theta_x = \sin^{-1} \left(- \frac{\partial Z_b}{\partial x} \right) \quad (6)$$

上述の支配方程式による土石流の追跡の精度は、河床せん断力 τ_b と侵食速度 E がいかに与えられるかに左右される。これには諸説があるが、ここでは江頭ら

の式を用いることとすれば、これらは、それぞれ次式で与えられる。^{4),6)}

$$\tau_b = \tau_v + \rho f U^2 \quad (7)$$

$$\frac{E}{U} = c_* \tan (\theta_x - \theta_e) \quad (8)$$

ここに、

$$\tau_v = \rho (\sigma / \rho - 1) c g h \cos \theta_x \tan \phi \quad (9)$$

$$f = \frac{25}{4} \left\{ k_r \frac{(1-c)^{5/3}}{c^{2/3}} + k_s \frac{\sigma}{\rho} (1-e^2) c^{2/3} \right\} \left(\frac{h}{d} \right)^2 \quad (10)$$

$$\tan \theta_e = \frac{(\sigma / \rho - 1) c}{(\sigma / \rho - 1) c + 1} \tan \phi \quad (11)$$

ここに、 θ_e は土石流の濃度 c に対する平衡河床勾配、 ϕ は砂礫の内部摩擦角、 e は砂礫の反発係数、 d は砂礫の代表粒径、 k_r および k_s は係数で、 $k_r = 0.25$ 、 $k_s = 0.0828$ である。

3. 実流域の概要と計算条件

3.1 流域の概要

住吉川は、兵庫県南部の六甲山を源流として、近畿圏三大都市の一つである神戸市の中央部を南北に走り、大阪湾へ流下する河川の一つである (図-1)。

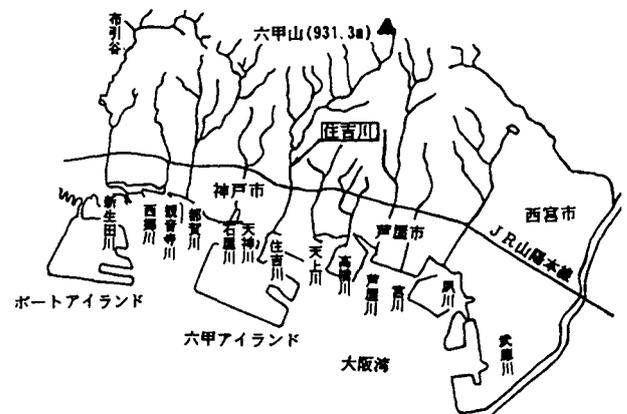


図-1 住吉川位置図

六甲山塊は、約50万年前から急激に上昇し始めるとともに、大量の土砂を大阪湾に供給し続けてきた。この結果、花崗岩類の堅い岩盤からなる六甲山地の南縁部にあたる臨海都市部には、新しい軟弱な地層が広く分布している。

土砂災害に対する弱点という観点から六甲山をみると、山麓部には風化され、強度的に弱い花崗岩が分布し、山地斜面は急傾斜で、亀裂の発達した岩盤が露出している。このため、住吉川においても、地形的には、山地内では急峻なV字谷を刻み、海岸近くの平野に出ると、土砂を氾濫・堆積させて明瞭な扇状地を形成し、市街地では天井川となっている。

このような条件を反映して、当流域では、集中豪雨などを誘因として過去に大規模な土砂災害が何度も発生しており（昭和13年、昭和42年など）、流路工や砂防ダムなどの砂防施設の整備が鋭意進められてきた。とくに、昭和42年の集中豪雨では、これらの施設が効果的に機能を発揮して、災害規模は小さく抑えられた。

しかし、近年、六甲山周辺では、山麓部を中心として宅地開発や住宅建設がさかんに行われており、住吉川においても、流域の都市化が急速に進行している。さらに、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震によって、流域内には多数の山腹崩壊が発生しており、斜面部には地割れも多数確認されるなど、地震動の強いインパクトを受けた。これらと、六甲山系の花崗岩を主体とした脆弱な地質およびこれまでの土砂災害の履歴を考慮すると、当流域には、土砂災害に対する危険性がいまなお高く内在していると考えられる。

3.2 計算条件

(a) 計算対象区間の設定、河床縦断形状、河幅および砂防ダムの条件

計算対象区間長は約2,500mである。この区間の河床縦断形状および河幅を図-2および図-3に示す。この区間の平均河床勾配は0.100で、砂防ダムは2基設置されており、上流側のNo.1のダムは未満砂状態、No.2のダムは満砂状態である。なお、本研究では、砂防ダムの堆砂条件として、現状および2基とも満砂状態の2ケースについて数値計算を行った。

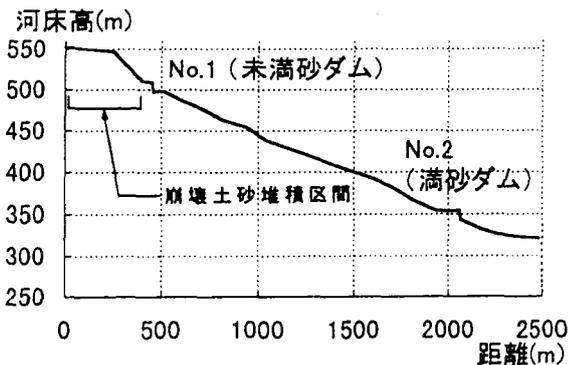


図-2 計算対象区間の河床縦断形状

(b) 堆積土砂の条件

計算対象区間最上流部の標高約540m付近は、平成7年1月の兵庫県南部地震後の現地調査において、多くの崩壊が確認されている。このため、本研究ではこの付近で大規模な斜面崩壊が発生したと仮定して、河道部に約50,000m³の土砂を堆積させている（図-2）。

(c) 水の供給条件

水の供給条件に関する直接的なデータは得られていない。そこで、過去に当流域に大規模な土砂災害をひき起こした昭和13年および昭和42年の集中豪雨の降雨記録を参考に、時間雨量 $r = 60\text{mm/hr}$ を想定し、計算区間最上流部の流域面積 ($A = 1.34\text{km}^2$) との関係から、流入流量として $Q_{in} = 15\text{m}^3/\text{s}$ を定常的に与え、そのときの土砂濃度は、便宜上 $c_{in} = 0.05$ とする。

(d) 数値計算および物理定数の条件

数値計算は、Two-Step Lax-Wendroff 法を用いて行った。差分の条件は、 $\Delta t = 0.02\text{s}$ 、 $\Delta x = 4.0\text{m}$ である。また、計算に用いた物理定数は、砂礫の密度 $\sigma = 2.65\text{g/cm}^3$ 、内部摩擦角 $\phi = 33^\circ$ 、静止体積濃度 $c_s = 0.50$ 、代表粒径 $d = 4.0\text{cm}$ である。

4. 計算結果および考察

図-4および図-5は、それぞれNo.1およびNo.2の砂防ダム付近の通水開始後の各時間における河床縦断分布を示す。ここで、距離 x は上流端を0mとしている。図-6は、2基の砂防ダムの上下流である $x = 400\text{m}$ 、 600m 、 $2,000\text{m}$ 、 $2,200\text{m}$ における流量（水+土砂）の時間変化を示し、図-7は、流量と同じ断面における土砂体積濃度の時間変化を示す。なお、図-6および図-7は、砂防ダムの堆砂条件が、現状および2基とも満砂状態の場合の2ケースの計算結果を併記している。

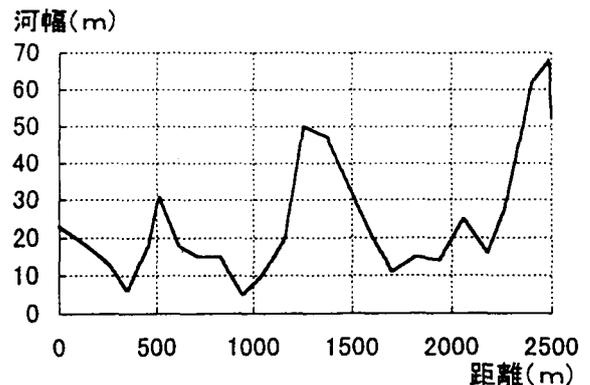


図-3 計算対象区間の河幅の縦断変化

これらの計算結果を参考にすれば、住吉川における土砂流出の特性は、つぎのようである。

4.1 現状の砂防ダムの条件下における土砂流出過程

(a) 上流部における土砂流出の特性

計算対象区間の最上流部では、水の供給を受けると同時に、 $x = 250\text{m}$ 付近の堆積土砂の勾配変化点近傍が急激に侵食を受け（図-4、 $t = 300\text{s}$ ）、瞬時に土石流が形成され（図-6、 $x = 400\text{m}$ ）、堆積物の侵食面は急激に遡上した。発生源付近におけるダイナミックな現象は、水の供給開始から約10分で終わり（図-4、 $t = 600\text{s}$ ）、その土砂は直下にあるNo.1の砂防ダム（未満砂状態）に堆積し、ここで土石流の流量および土砂濃度はかなり減少している。すなわち、ダム上流の $x = 400\text{m}$ で、 $Q_{\text{max}} = 67\text{m}^3/\text{s}$ ($t = 300\text{s}$)、 $c_{\text{max}} = 0.50$ ($t = 250\text{s}$)、ダム下流の $x = 600\text{m}$ で $Q_{\text{max}} = 50\text{m}^3/\text{s}$ ($t = 300\text{s}$)、 $c_{\text{max}} = 0.35$ ($t = 300\text{s}$) である（図-6, 7, No.1のダムは未満砂）。

また、No.1の砂防ダムでは、空容量に土砂が貯留された後には、土砂はダム下流に流出するが、堆積土砂の勾配変化は土石流の発生直後に比べて緩やかになっている（図-4、 $t = 1,200\text{s}$ ）。

なお、この区間の土砂濃度は、 $0.35 \sim 0.50$ 前後で推移しており、この領域の流れは、土石流としての性質をもっている。

(b) 中・下流部における土砂流出の特性

中流部では、多少の侵食や堆積はあるものの（図-5、 $x = 1,600\text{m}$ ）、土石流の流勢にはあまり変化はみられない。そして、下流部では、No.2の砂防ダム付近に特徴的な堆砂がみられる。すなわち、土石流は、No.2の砂防ダム（満砂状態）地点に約800s後には到達し（図-6、 $x = 2,000\text{m}$ 、No.1のダムは未満砂）、ダム上流に堆積し、堆砂域は緩い勾配で遡上している（図-5、 $t = 900\text{s} \sim$ ）。そして、約1,200s以降、土石流は砂防ダムを越流し、ダム直下に堆積している（図-5、 $t = 1,200\text{s} \sim$ ）。ダム上下流の流量および土砂濃度は、ダム上流の $x = 2,000\text{m}$ で $t = 1,000\text{s}$ のとき、 $Q_{\text{max}} = 37\text{m}^3/\text{s}$ 、 $c = 0.15$ 、ダム下流の $x = 2,200\text{m}$ で $t = 1,000\text{s}$ のとき、 $Q_{\text{max}} = 30\text{m}^3/\text{s}$ 、 $c = 0.27$ である（図-6, 7, No.1のダムは未満砂）。

このように、土石流の流量は、No.2の砂防ダム通過後には減少している。一方、土砂濃度はダム通過後には増大するが、これは、土石流のダム下流への堆積が進行したためである。

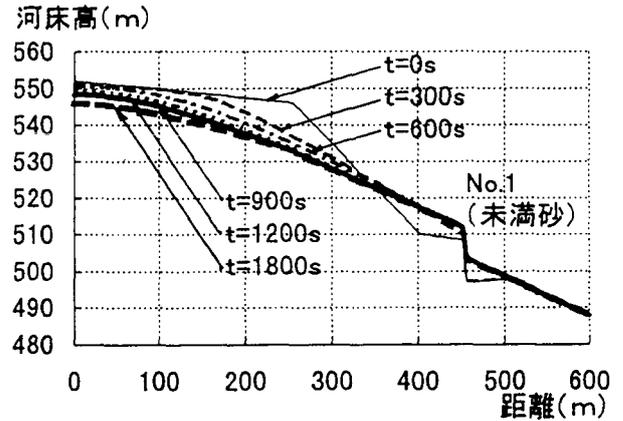


図-4 河床縦断変化 (No.1付近)

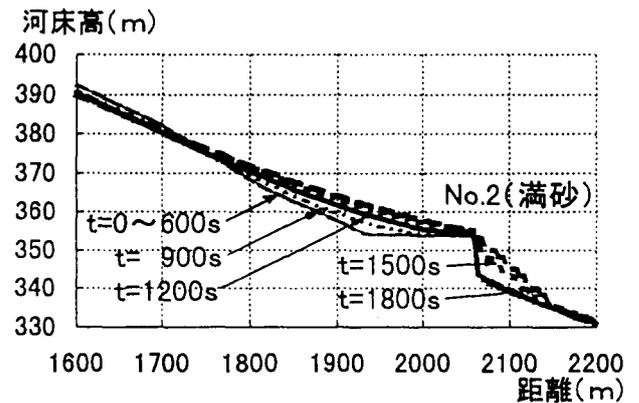


図-5 河床縦断変化 (No.2付近)

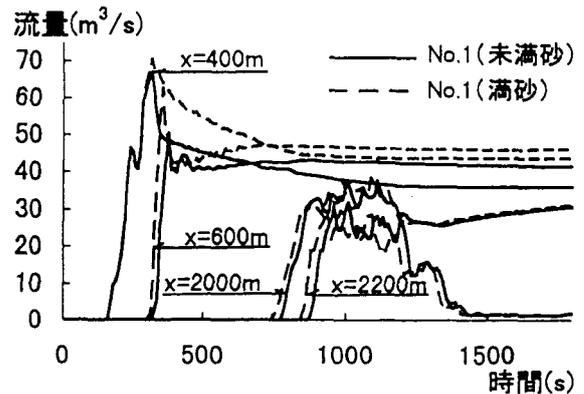


図-6 流量 (水+土砂) の時間変化

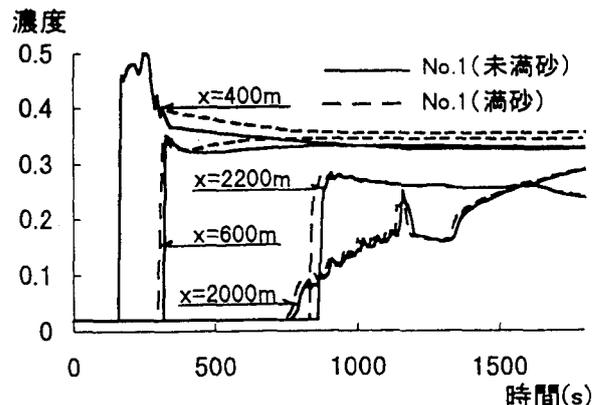


図-7 土砂体積濃度の時間変化

さらに、この区間の土砂濃度は0.30以下となっており、この領域の流れは、いわゆる土砂流の形態へと変化している。

なお、水の供給開始から約1,500s経過後において、下流部の土石流の流量は、非常に小さく（図-6、 $x = 2,200\text{m}$ 、No.1のダムは未満砂状態）、このことから、今回の計算条件下では、上流部では土石流は発生するものの、砂防ダムの効果により、土石流は下流の市街地部の河道へは直接流下しないものと思われる。

4.2 砂防ダムの土石流調節効果の考察

現状の砂防ダムの条件下における住吉川の土砂流出地性は上述のとおりである。つぎに、同一条件のもとに、No.1の砂防ダムを満砂状態として、数値計算を行った。その結果をもとに、砂防ダムの土石流調節効果について考察する。

まず、No.1の砂防ダム付近でみると、ダム上下流の流量は、ダム上流の $x = 400\text{m}$ で、 $Q_{\max} = 70\text{m}^3/\text{s}$ （ $t = 300\text{s}$ ）、ダム下流の $x = 600\text{m}$ で、 $Q_{\max} = 63\text{m}^3/\text{s}$ （ $t = 400\text{s}$ ）であり、砂防ダムによる流量の軽減は、未満砂状態の場合と比べて小さくなっている（図-6、No.1のダムは満砂）。一方、土砂濃度は、0.35～0.50前後で推移しており、No.1の砂防ダムが未満砂状態の場合と大差はない（図-7、 $x = 400\text{m}$ 、 600m 、No.1のダムは満砂）。これは、満砂ダムであっても、流砂の質を変化させる効果が生じていることを示している。

つぎに、No.2の砂防ダム付近では、ダム上下流の流量および土砂濃度ともに、未満砂状態の場合と大差はないが（図-6,7、 $x = 2,000\text{m}$ 、 $2,200\text{m}$ ）、土石流のダム地点への到達時間が若干早くなっている（図-6、 $x = 2,000\text{m}$ ）。

以上の計算結果によれば、砂防ダムは、単に空容量に土砂を貯留して、土砂流出を直接的に抑止するだけでなく、土砂濃度の変化や到達時間の遅滞などによって、土石流の流勢をやわらげ、下流の氾濫を抑えるといった緩衝機能を有しており、それらの機能は、未満砂はもちろん満砂の砂防ダムであっても十分に発揮されることがわかる。

5. 結 語

以上、本研究においては、砂防ダムを有する実流域を対象として、堆積土砂の二次侵食による土砂流出を想定して数値計算を行い、その結果に基づいて、山地河川の土砂流出特性に関する検討を行った。

その結果、いくつかの興味ある知見が得られた。それらを列挙すると、つぎのとおりである。

- 1) 土石流の発生源において、土石流の発生直後に堆積物の侵食面が急激に遡上する現象はよく知られているところである。今回の数値シミュレーションにおいても、これらのダイナミックな現象がよく表現されており、これより、堆積土砂の二次侵食による土石流の発生過程を数値解析によって再現できることを示した。
- 2) 砂防ダムを有する領域の土砂流出特性から、土砂流出現象は溪床勾配の影響を強く受けることが示された。具体的には、砂防ダム上流の堆砂域では、満砂状態であっても、さらに土砂を堆積させて流量と土砂濃度をコントロールし、砂防ダムの下流においても土砂の堆積を促進させた。
- 3) 上述の砂防ダムの土石流調節効果をさらに検証するために、砂防ダムの堆砂条件を変化させて、現状との比較計算を行った。その結果、未満砂はもちろん満砂の砂防ダムであっても、流砂の質を変化させて、土石流を土砂流へ遷移させる効果や、土石流の下流への到達時間を遅滞させる効果を有することが、数値的に確認された。
- 4) これらの計算結果を検証するための具体的なデータは得られていないが、以上より、砂防ダムを有する山地河川において、堆積土砂の二次侵食による土石流の形成・流動・堆積過程を、数値解析によってある程度再現できることを示した。
- 5) また、土砂流出過程において、これまで定性的に述べられてきた砂防ダムの機能を、数値的に議論するための方法を示した。

一方、今後解明すべき重要な課題も残されている。たとえば、今回の計算条件では、水の供給条件は定常流量で与え続けたが、土石流の減速特性の問題を議論するためには、流量の供給時間の設定をいかに行うかが重要である。また、土砂流出の規模は侵食速度によって規定されるが、実際には、堆積物中の巨石の存在に依存している可能性がある。これは、今後、実現象を取り扱う上できわめて重要である。

最後に、本研究を推進するにあたり、終始あたたかいご指導と貴重なご助言を賜った立命館大学理工学部江頭進治教授に心から感謝いたします。また、麻田鉄児君（当時立命館大学理工学部土木工学科4回生、現在大阪市役所勤務）には、現地調査および数値解析にあたり、種々ご協力願った。ここに記して謝意する次第である。

参 考 文 献

- 1) 高橋 保：土石流の停止・堆積機構に関する研究（3），京都大学防災研究所年報，第25号B-2, 1982, pp327-348.
- 2) 橋本 晴行・椿東一郎・平野宗夫：土砂の掃流状集合流動について，第30回水理講演会論文集，1986, PP235-240.
- 3) 高橋 保・中川 一・佐藤広章：扇状地における土砂氾濫災害危険度の評価，京都大学防災研究所年報，第31号B-2, 1988, pp655-676.
- 4) 江頭進治・芦田和男・矢島 啓・高濱淳一郎：土石流の構成則に関する研究，京都大学防災研究所年報，第32号B-2, 1989, pp487-501.
- 5) 江頭進治・芦田和男・高濱淳一郎・田野中新：エネルギー散逸機構に基づく流砂モデル，京都大学防災研究所年報，第33号B-2, 1990, pp293-306.
- 6) 江頭進治：土石流の停止・堆積のメカニズム(2)，新砂防 Vol. 47, No. 21, 1993, pp51-56
- 7) 江頭進治・本田尚正・麻田鉄児：六甲山系住吉川における土砂流出のシミュレーション，平成8年度土木学会関西支部年次学術講演会論文集, 1996, 投稿中.
- 8) 江頭進治・本田尚正・麻田鉄児：砂防ダムの土石流調節効果に関する一考察，平成8年度土木学会関西支部年次学術講演会論文集, 1996, 投稿中.