

粘性土石流の発生、流動、堆積のメカニズムと対策

諏訪 浩・澤田豊明・新井宗之*・高橋 保・水山高久**

*名城大学理工学部

**京都大学農学研究科

要 旨

中国雲南省の蔣家溝を対象に、粘性土石流のメカニズムと土石流対策に関する観測調査を行って、土石流が降雨の発生時刻からかなり遅れて発生すること。土石流が、多数のサージが間欠的に流下するという一連のイベントからなっていて、その間欠性は、降伏応力を用いたモデル、天然ダムの決壊モデル、流れの不安定性に基づくモデルを用いて説明が試みられていること。砂礫の濃度が著しく大きいにもかかわらず、土石流が流れ易いこと。流動中の土石流には栓流が存在しないこと。さらに、蔣家溝の中下流域での、土石流発生に伴う地形変化が災害発生ポテンシャルを高めていること。禿げ山化した山地の緑化が進められた結果、土石流発生などの土砂流出抑制効果が認められたが、そのメカニズムの検討が課題であることを述べた。

キーワード：土石流、泥流型、間欠流、蔣家溝、小江、雲南省

1. はじめに

土石流には、細粒成分すなわち粘土やシルトの濃度が小さくて、粗粒成分すなわち砂や石礫の濃度の大きな石礫型土石流と呼ばれるものと、粗粒成分の濃度が小さいが、細粒成分の濃度が大きい泥流型土石流とがある。我が国では、石礫型の土石流が多く発生して災害を起こしてきたので、この石礫型の土石流を中心に研究が進展してきた。

中国では、その国土の地質、地形、気候の多様性に応じて、我が国以上に様々なタイプの土石流がみられる。細粒成分の濃度が小さくて石礫の目立つ土石流を水石流と呼び、細粒成分の濃度が大きいタイプを泥石流と呼ぶ。泥石流は、さらに、土砂濃度が高く、嵩密度が 2ton/m^3 程度以上のものを粘性泥石

流、これより小さいものを希性泥石流と呼ぶ。

雲南省東川市を小江という川が流れている。小江に注ぐ溪流の多くがこの粘性泥石流を発生する。長江の上流は金沙江となるが、小江は金沙江の支流である。小江の一支流である蔣家溝は、粘性土石流を頻繁に発生することで知られている。規模の大きな土石流が発生すると、小江が堰き止められて、上流に冠水、土砂堆積に伴う鉄道の埋積などの被害が及ぶという問題を引き起こしてきた。このため、1973年から蘭州氷河凍土研究所が蔣家溝で土石流の観測を開始した。1980年からは成都地理研究所がこの観測を引き継ぐことになった。成都地理研究所は1988年に成都山地災害環境研究所と改称している。この間、様々な研究の取り組みがあったが (Li et al., 1983)、その特異な発生、流動のメカニズムが充分

に解明されたとは言えない。そこで1991年から、京都大学防災研究所と、中国科学院成都山地災害環境研究所が協力して、この粘性土石流のメカニズムの解明と、その対策に関する研究を開始した。

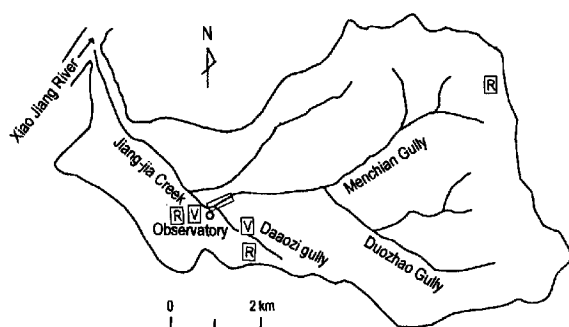


Fig. 1 Plan of the drainage basin of Jiang-jia Creek.

[R] : rain gauge, [V] : Video camera system

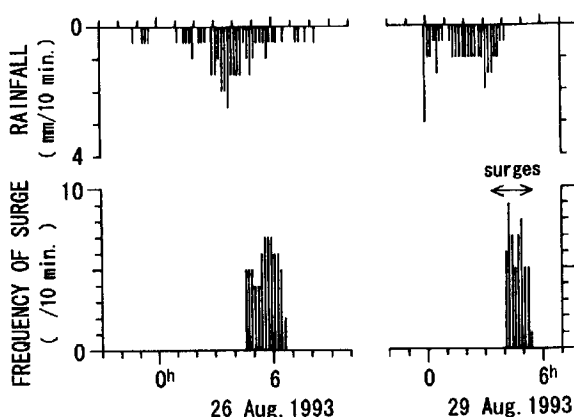


Fig. 2 Frequency of debris-flow surge at the observation reach of Jiang-jia Creek and 10 minute rainfall at the Daaosi rain-gauge site

2. 流域の地形・地質と観測・調査

雲南省はユーラシアプレートとインドプレートの衝突の影響を強く受ける地域の東端に位置していて、地殻変動が活発な地域にある。雲南省北西部にある小江は、南北に走る活断層に沿って開析の進む谷筋であり、蒋家溝はこの断層に斜交する断層に沿って開析の進む谷筋である (Fig. 1)。東川市付近を震源とする大地震は近年のものだけでも3回(1733年にM7.5, 1833年にM8, 1966年にM6.5)を数える。地震の度に地盤のゆるみや地すべりが発生している

が、これらと、人為的な山地の禿げ山化とが流域の荒廃の原因になっていて、この一帯では激しい土砂生産・流出がつづいている。

この地域の山地は、およそ300年前までは森林に覆われていたが、その後、銅鉱が発見されるとともに、精錬用の燃料を得るために森林が伐採されつづけたことと、家畜の放牧など人口増加に伴う土地利用の進展とが、山地の禿げ山化を進めたと言われている。年降水量が600から900mmとあまり多くないのに加えて、雨季と乾季の区別が明瞭な気候のせいで、いったん破壊された森林は容易には回復しない。しかし、1976年の森林面積4%を下限に、その後の植林の進展により、現在では森林面積が20%程度にまで回復してきている。蒋家溝の流域は、地質は主に古生代二畳紀の堆積岩である。降雨の度に発生する土石流によって、大量の土砂が流出しており、その量は年間500万 m^3 に達することもある。

蒋家溝での現地観測・調査を中心に粘性土石流の機構解明とその対策に関する研究を日中共同で進めている。内容は、粘性土石流の流動の観測、流域の水文特性の調査と降雨観測、土石流発生に伴う溪流の地形変動調査、粘性土石流の現地実験と水路実験、粘性土石流の数値シミュレーション、土石流対策の調査と評価などにわたる。それぞれの調査研究に関して、これまでの成果と問題点について報告する。

3. 土石流発生の降雨条件

強雨によって溪床堆積物が流動化して発生するタイプの土石流では、大きな降雨強度に即応して土石流が発生する。例えば焼岳上々堀沢では10分より短い時間分解能で表現される降雨強度の時間変化に敏感に対応して土石流が発生していること、したがって、そのような短時間の降雨強度の大きな値の出現時刻と土石流の発生時刻がほぼ一致することが分かっている (Suwa and Sawada, 1994)。大きな降雨強度によって溪床に表面流が発生し、この表面流が溪床を侵食して土石流を発生させるからである。

蒋家溝でも降雨によって土石流が発生する (Fig. 2)。しかし、その様相はずいぶん異なる。土石流は、降雨強度の大きな雨の発生時刻からかなり遅れて発生し始める。時間遅れは1~5時間にもなる。土石流の発生地点が観測地点より4~5 km上流であることを考慮しても、発生時刻は流動の観測時刻から10分程度しか遅らないので、降雨と土石流発生時刻の関係は基本的に変わらない。いったん土石流が発生し始めると、土石流のサーズすなわち土石流段波は何度も繰り返し流下し、降雨終了後もさらに1~

3時間にわたってサージが発生し続ける場合さえある。これは粘性土石流の発生過程が石礫型の土石流と大きく異なるためだと思われる。土石流の発生に、表面流よりも地中流や地下水が関与しているためだと考えることもできるが、むしろ次のような条件によっているのではないかと思われる。すなわち、蔣家溝の上流域には多数の支谷が存在し、無降雨時にも地中水や地下水が集まりやすく、支谷沿いには液性限界に近い状態の土砂が控えている。降雨が始まると、このような土砂が蔣家溝の本川へ集まってきて土石流の発生条件をつくりだすものと思われる。土砂の集積に要する時間が、土石流発生開始時刻の遅れとなっているものと思われる。ただし、土砂の集積過程とサージが流動を開始するプロセスの現地での観測にはまだ成功していない。今後の課題である。Fig. 1 に降雨観測点3箇所と、ビデオカメラシステムによる土石流観測点2箇所の位置を示す。



Photo 1 Frontal part of the channelized debris-flow surge in Jiang-jia Creek

4. 土石流の流動特性

蔣家溝では、土石流が発生し始めると、Photo 1 に示すような土石流のサージが間欠的に流下するという一連のイベントが暫くつづく。その様子を示すと、Fig. 3 のようになる。多くの場合この例のように、イベントのはじめのほうでサージの流動深、流速、体積が大きく、また、サージの通過時刻の間隔は小さくて、比較的一様である。ところが、時間の経過とともに、サージの流動深、流速、体積は、この例のように減少してゆくことが多いが、サージの通過時間間隔は、そのばらつきが増大しつつ、平均的には増大傾向を示す。そして、ついには間欠的な

サージは発生しなくなり、とぎれずにつづく泥流状の流れに、さらに時間が経過すると掃流状態の水流に移行する。土石流サージの固体粒子の体積濃度は大きく、80%を超えることもある。この場合の嵩密度は 2.1 ton/m^3 以上に達する。イベントの終わりのほうで流下する土石流サージの固体粒子濃度は減少してゆき、間欠流が発生しなくなって、その後に続く泥流状の流れは、いわゆる掃流状集合流動になっているようである。

間欠流が発生するメカニズムについてはいくつかの説がある。Davies et al. (1991) は次のように考えた。粘性土石流のスラリーの剪断応力と剪断速度の関係にはヒステリシスが存在し、サージが停止するときの剪断降伏応力はやや小さい値でこれを下限降伏応力 T_{yl} 、サージが流動し始める時の値はやや大きく、これを上限降伏応力 T_{yu} と呼ぶ。蔣家溝上流の谷底へガリーから土石流の材料となるスラリーが集まってきて、その厚みが、上限剪断応力 T_{yu} に対応する厚みを越えると、それまでほとんど静止していたスラリーが急に流動をはじめ、サージが発生する。ガリーからのスラリーの供給がつづく間は、このようなプロセスが繰り返すことによってサージが間欠的に発生する。

高橋ら (1997) と水山ら (1997) は、次のように考えた。ガリーが蔣家溝の本川へ合流するところへは強雨の最中にガリーから土砂の流出があり、本川に天然ダムが形成される。このダムを形成する土砂は液性限界近傍の含水率の高い状態にあり、天然ダムの決壊とともに容易に流動化してサージが発生する。このような地形条件は蔣家溝の上流域に数多く存在しており、天然ダムの決壊が場所を変えて次々起こるとともに、同じ箇所でも繰り返すことが考えられ、サージは間欠的に発生することになる。

また別のプロセスも想定できる。強雨によってガリーから土砂の供給が始まると、蔣家溝の上流では土石流が比較的連続した状態で流れている状況が想定できる。このような上流地点から、土石流の観測点までは3~6 km あり、土石流が流れている間に、流れ自体の不安定性のために連続した流れから、段波が離散的に連なった状態になることが考えられる。実際の現象は、上述のメカニズムのうちのただ一つに起因するというより、これらのメカニズムが複合した結果であるのかもしれない。間欠流発生のメカニズムの解明は大きな課題である。

土石流のサージは、Fig. 3 に示すように、規模が相対的に大きくて流速の大きいものと、規模が小さくて流速の小さいものが混ざり合って観測点の前を通過してゆく。澤田 (1997) は、個々のサージが、

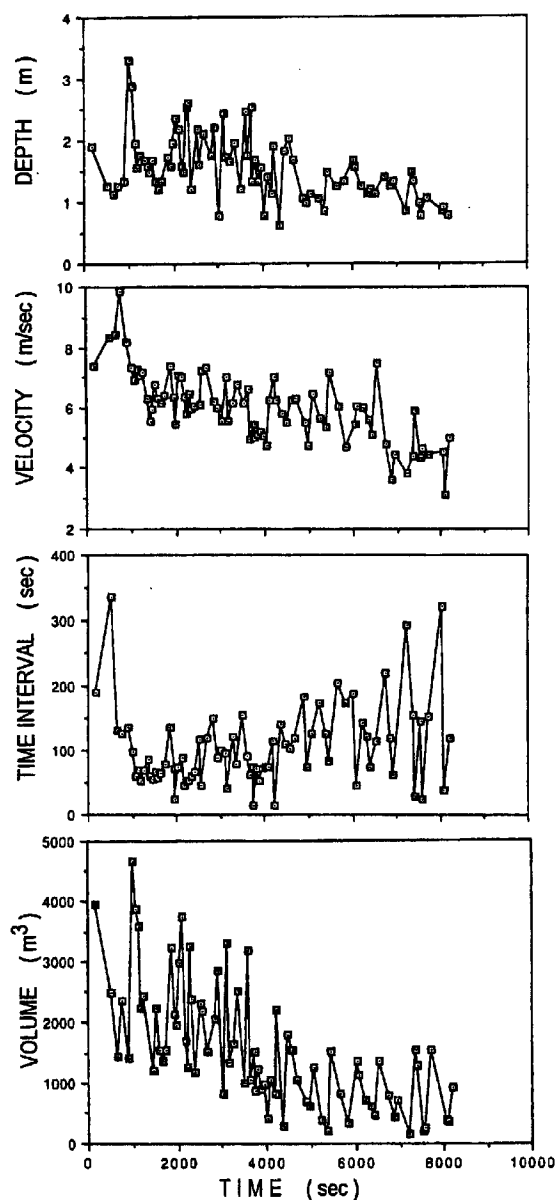


Fig. 3 The temporal change in the flow depth, the frontal velocity, the time interval and the volume of the 13 August 1991 debris-flow surges. TIME is the time from 11:37 a. m.

上流から下流にかけてある区間、それぞれの等速で流下するとしてサージの走時直線を引くと、これらの走時直線が比較的頻繁に交わることを報告した。走時直線が交わることは、後方のサージが前方のサージに追いつくことにあたり、澤田は、このとき、大きなサージが、前方を行く小さなサージを追い越すという説を報告したが、実際には、後方のサージが前方のサージに追いついてこれを巻き込み、規模が大きくなって流速が増大することになるはずであ

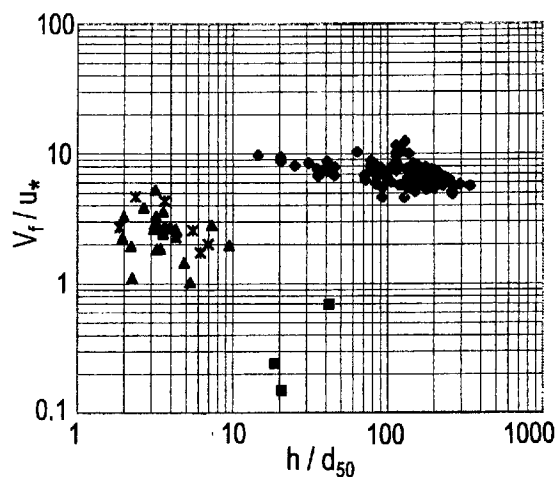


Fig. 4 Relationship between the velocity coefficient which is the ratio of the frontal velocity V_f to the friction velocity u_* of the flow, and the relative depth which is the ratio of the maximal flow depth h to the median diameter d_{50} of solid particles in the surging flow. ◆: debris flows at Jiang-jia Creek, ▲: debris flows at Kamikamihori-zawa Creek, Mount Yakedake, ■: debris flows of the field test, *: debris flows at the flume test

る。したがって、上流に比べて、下流では、通過するサージの個数は減少するはずである。走時曲線は、実際には直線ではなく曲線となるが、上述のようなサージが追いつくという現象が起こることに変わりはない。

5. 粘性土石流のレオロジー

蔣家溝に発生する土石流は数十センチメートル以上の大径礫をほとんど含まず、固体粒子の最大粒径は10 cm程度で、中央粒径は約1 cmである。石礫型の土石流と比較すると、粘土やシルトなどの細粒成分の含有率が高く、粒径2 cm以下の試料では、それぞれの体積濃度はおよそ、2%、13%である。固体材料の濃度が高いので土石流の密度は最大2.3 ton/m³という大きな値に達することもある。やや大きな石をサージの表面めがけて投げ込むと、石はすぐには沈まないほどである。それでも石礫型の土石流と比べると、蔣家溝の土石流は著しく流れやすい。

サージの先端速度と摩擦速度の比を流速係数とし、サージの流動深と固体粒子の中央粒径の比を相対水深として、流速係数と相対水深の関係をFig.4に示す。流速係数は抵抗係数 f の $-1/2$ 乗に比例するも

ので、流速係数が大きいことは流れ易いことに対応する。この図から、焼岳に発生する石礫型土石流に比べると、蔦家溝の土石流は著しく流れ易いことが分かる。

いっぽう、流動中の土石流の表面を詳細に観察した結果、粘性土石流には栓流（プラグ）が存在しないことが明らかになった。これは、土石流サージの先端が通過して流速が著しく低下した段階でも、流れの中央部分がゆっくり膨らんで砕波するように変形しつづける状況が観察できるなどのことから分かる。剪断降伏応力は著しく小さいはずである。従来は、粘性土石流は比較的大きな剪断降伏応力を想定したビンガム流動で説明でき、したがって、流れの中央部に栓流が出現するとする説が定説であったことを考えると、これは重要な知見であり、粘性土石流の流動のメカニズムに対しては、新たなモデルを用いた説明が必要であることを示す。

6. 土石流の現地実験と水路実験

1995年には、次のような方法で、土石流の現地実験を行った。観測所から蔦家溝を2 km 遡った地点へ、右側の斜面から合流するガリの上流に堰を設けて湛水し、堰を破って水を一気に流下させるとともに、この水流に向けて土砂を供給して発生させた高濃度の土石流が、扇状地の中の流路を流下するときの流動状況を測定するとともに、流動物を採取して、固体粒子の濃度と粒径分布を調べた。実験の様子をPhoto 2に示す。測定点付近の流路の縦断傾斜角は 13.4° 、流路幅は約2 m、深さ約0.5 m、横断面形はU字形である。実験は3回行った。出現した流れの平均水深は0.14~0.2 m、平均流速は0.08~0.43 m/secの範囲であった。この流れの流速係数と相対水深を求めると、Fig. 4で示すように、流速係数は0.15~0.7で、1より小さい領域である。流動材料は実際の土石流とほとんど同じでありながら、著しく流れ難いことが分かる。これは、実際の土石流と比べて、代表流速 U と代表長さ L の積が 10^3 程度以上小さいこと、すなわち、動粘性係数が変わらないとすると、レイノルズ数が3桁以上小さく、慣性力に比べて粘性力が支配的な流れとなっているためだと言える。

さらに1996年には、次のような方法で土石流の水路実験を行った。傾斜が 21.8° 、幅0.16 m、深さ0.17 m、表面がペンキ塗布仕上げの木製水路の上端に、土砂と水の混合材料を一気に供給して土石流を発生させた。その様子をPhoto 3に示す。土砂は、4日前に蔦家溝に発生した土石流の堆積物を採取し



Photo 2 Scene of a field-test run of an artificial debris flow



Photo 3 Scene of a debris-flow experiment using a flume

て用いた。実験は8回行ったが、出現した流れの平均水深は0.02~0.037 m、平均流速は0.6~2.0 m/secの範囲であった。Fig. 4では焼岳の土石流のものとほぼ同じ領域にプロットされることが分かる。流動材料は実際の土石流と全く同じでありながら、著しく流れ難かったわけである。理由は現地実験の場合と同じである。現象の規模がちがうと、流動時の性質が大きく変わることが分かる。現象のスケールファクターを考慮に入れて、粘性土石流のメカニズムを検討する必要がある。

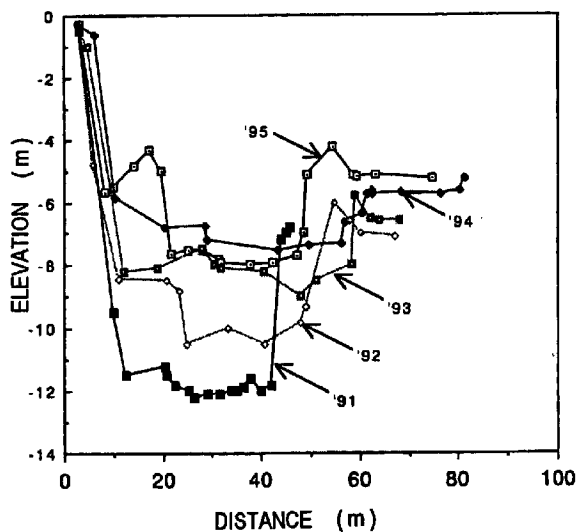


Fig. 5 Change in a cross section in the middle reach of the Jiang-jia Creek from 1991 through 1995

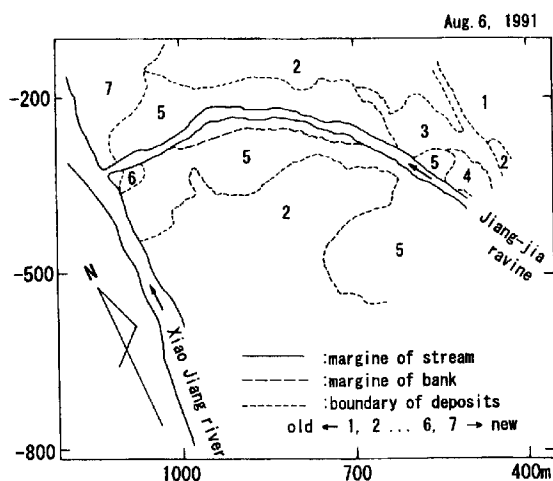


Fig. 6 The fan of the Jiang-jia Creek near the confluence to the Xiao-jian River

7. 土石流の発生に伴う地形変化

蔣家溝では、土石流が発生する度に溪流沿いに地形変化が生じている。上流域でも激しい溪床変動が生じているが、地形変化が人間の営みに直接大きな影響を及ぼすのは、中流域の流路周辺と下流の扇状地である。観測所の位置する中流域の谷底平地はもとも土石流の氾濫原である。土石流の氾濫域といえども、土石流の氾濫がおさまって1～2年経過すると、耕地に利用されるようになる。しかし、土石流の度に河床変動が生じるので、経年的に見ると例

えば、Fig. 5 に示すように著しい河床上昇の結果、再び土石流の氾濫によって農地が破壊されることになる。谷底低地ではこのような農地の創生と破壊を繰り返しているが、集落はこのような谷底低地に立地せず、急斜面や段丘上あるいは丘陵台地上に立地するので、集落が土石流の直撃を受けて災害になるというようなケースは、蔣家溝流域に限っていえば、希である。このような経年的な河床変動の進行と、その間に発生した土石流の頻度、規模などの履歴との関係を検討している。

小江流域では土砂生産が激しいので、東川市付近では年間 30 cm 程度の速度で河床が上昇してきた。とくに、蔣家溝が小江に合流する地点では、河床上昇が著しく、蔣家溝から発生した規模の大きな土石流が本川を閉塞し、上流の農地や鉄道、道路などが土砂で埋積あるいは冠水するなどの災害がしばしば発生している。Fig. 6 に蔣家溝が小江へ合流する付近の扇状地を示す。蔣家溝からの土石流が上述のような本川閉塞を生じないように、土堤を用いて、蔣家溝がなるべく下流部で小江に合流するように導流してあったが、蔣家溝の流路は、工事の数年後には元の上流地点へ向けて移動してしまっている。このように土砂生産の激しい溪流の扇状地における土砂流送の制御は如何にあるべきかを念頭に置きつつ、扇状地の地形変化を追跡している。

8. 土石流対策

1991 年に、四川省から雲南省へかけての地域の土石流溪流と、東川市の土石流溪流を訪れ、主として、それらにおける土石流対策を視察検討した。荒廃溪流に砂防ダムや床固を施工して河床を固定したり、侵食基準面を高くして斜面下部の侵食を緩和するという工法もとられていたが、満砂した土砂を除石するなどの対策工に対する保守を一切しないとか、流出してくる土石流を安全に流下させるための導流堤を施工する場合、流路を掘り込まずに、天端幅が 1 m にも満たない練り石積工による堤防を扇状地の上に施工して築堤するなど、我が国の工法とは異なった方法がとられている点も多い。その中で最も注目されたのは、禿げ山化した山地に植林をしようという緑化計画であった。植生さえ回復すれば、斜面の侵食、地すべり、土石流の発生などを抑えることができるとの中国側の説明に対し、日本側は、緑化だけでこのような土砂流出対策は充分だろうかとの疑念を抱かざるを得なかった（水山ほか、1992）。

東川市の土石流溪流を 5 年ぶりに訪れて、各溪流の状況を再び調べた結果、最近では砂防ダムや流路工

など構造物による新たな対策は行われていないが、その後も植林などの緑化が進められていて、最近では土石流が発生しておらず、ダム堆砂も進んでいないことを確認すると、植林による緑化の土砂流出抑制効果を認めざるを得ない。そのメカニズムの定量的な評価が今後の課題である（水山ほか, 1997）。

9. 結 語

雲南省の東川市を流れる荒廢溪流である蒋家溝を対象に、中国科学院成都山地災害環境研究所と共同で、粘性土石流のメカニズムと土石流対策に関する研究を進めてきた。主な成果と今後の課題を記すと以下のようになる。

①土石流は、降雨の発生時刻から1～5時間遅れて発生している。これは、降雨によって支沢から本川へ土砂が集積するのに、この程度の時間を要するためだと推定できるが、実際のプロセスの観測が課題である。②土石流は、多数のサージが間欠的に流下するという一連のイベントからなっている。サージのこの間欠性は、降伏応力を用いたモデル、天然ダムの決壊モデル、流れの不安定性に基づくモデルを用いて説明が試みられている。サージの発生過程の観測と、その実態を説明できるモデルの構築が課題である。③土石流は砂礫の濃度が著しく大きいにもかかわらず、流れ易いことが特徴である。また、流動中の土石流には栓流が存在しないことが、新たに明らかになった。これは、粘性土石流に対する従来の説を大きく変えるものであり、そのメカニズムについて、新たなモデルの構築の必要性を示唆する。④人工土石流の現地実験と水路実験を行ったところ、実際の土石流と比べて、著しく流れ難い土石流しか発生させることができなかった。これは、慣性力に比べて粘性力が支配的な流れとなるためであり、実際の現象を検討する場合には、このようなスケールファクターを考慮に入れる必要を示唆する。⑤蒋家溝の中下流域での、土石流発生に伴う地形変化が災害発生ポテンシャルを高めている。河床変動と土石流の履歴との関係、扇状地上の土砂移動の制御などについて検討を進めることが課題である。⑥禿げ山

化した山地の緑化が進められつつあるが、その結果、土石流発生などの土砂流出抑制効果が認められた。そのメカニズムの検討が課題である。

謝 辞

この研究の一部は、京都大学防災研究所特別事業「東アジアにおける自然災害の予測とその防御に関する研究」および、文部省科学研究費補助金国際学術共同研究 07044144（研究代表者：高橋 保）を用いて実施している。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 呉 積善ほか編 (1990): 雲南蒋家溝泥石流観測研究, 科学出版社, 251p.
- 澤田豊明 (1997): 中国雲南省の土石流 (3), 砂防学会研究発表会概要集, pp.8-9.
- 高橋 保・中川 一・里深好文・富田貴敏 (1997): 粘性土石流の間欠性, 京都大学防災研究所年次研究発表講演会要旨集, No.3-45, 1p.
- 水山高久・高橋 保・水原邦夫・沢田豊明・諏訪 浩 (1992): 中国の土石流対策, 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 45, No. 2, pp. 22-27.
- 水山高久・高橋 保・欧 国強・康 志成 (1997): 中国雲南省東川市周辺の土石流対策 (第2報), 砂防学会誌 (新砂防), Vol. 49, No. 6, pp.29-33.
- Davies, T. R., Phillips, C. J., Pearce, A. J. and XinBao Zhang (1991): New aspects on debris flow behavior, Proc. Japan-U. S. Workshop on Snow Avalanche, Landslide, Debris Flow Prediction and Control, pp. 443-451.
- Li, J., Yuan, J., Bi, C. and Luo, D. (1983): The main features of the mudflow in Jiang-Jia Ravine, Zeitschrift fur Geomorphologie, Vol. 27, No. 3, pp. 325-341.
- Suwa, H. and Sawada, T. (1994): Comparison between the viscous debris flow and the stony one, 科研費補助金国際学術研究 (No.03044085) 報告書, pp.56-67.

Studies on the Mechanism of Viscous Debris Flows and Countermeasures against them

Hiroshi SUWA, Toyoaki SAWADA, Muneyuki ARAI *, Tamotsu TAKAHASHI,
and Takahisa MIZUYAMA * *

* Faculty of Science and Technology, Meijo University

* * Graduate School of Agriculture, Kyoto University

Synopsis

The observational study on the viscous debris flows at Jiang-jia Creek in Yunnan Province, China clarified the following points. The time delay of one to five hours from the beginning of rainfall to the onset of debris flow may be ascribed to an accumulating process of slurry from tributary gullies to the main channel bottom at the source reach of the debris flow. The intermittence of debris-flow surge may be explained through the mechanism either of or a complex of an yield strength model, a model of a series of breaching of small natural dams, or a model of an instability of the flow itself. The absence of plug-flow phenomena in the viscous debris flow indicates the yield strength of the flow is unexpectedly small, and a new alternative model is necessary to explain the mechanism of viscous debris flow. The field survey of the countermeasures against debris flows in Dongchuan County over five years showed the tree-planting project at mountain slopes in these several years may have been effective in increasing the slope stability, suppressing sediment discharge and debris flows. Further study is needed to evaluate this effect of countermeasure quantitatively.

Keywords: debris flow, intermittent flow, Jiang-jia Creek, Xiao-jiang River, Yunnan Province