

2010年7月広島県庄原市において発生した崩壊型土石流の流出特性について

A STUDY ON DEBRIS FLOW DISCHARGE IN SHOBARA CITY IN JULY, 2010

永野 博之¹・羽田野 賀義²・杉原 成満³・渡辺 新⁴・朝位 孝二⁴

Hiroyuki NAGANO, Kesayoshi HADANO, Shigemitsu SUGIHARA,

Arata WATANABE and Koji ASAII

¹ 山口大学大学院理工学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）

E-mail: h-nagano@yamaguchi-u.ac.jp

² 山口大学大学院理工学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）

E-mail: khadano@yamaguchi-u.ac.jp

³ 中電技術コンサルタント株式会社（〒734-8510 広島市南区出汐2丁目3-30）

E-mail: sugihara@cecnnet.co.jp

⁴ 山口大学大学院理工学研究科（〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1）

Key Words: debris flow, debris flow simulation, Shobara city, debris flow disaster, landslide

1. はじめに

2010年7月16日、広島県庄原市において活発な梅雨前線に伴う豪雨により、多数の山腹崩壊・土石流が発生し、人命・家屋に被害をもたらした。川北町篠堂川の上流域では土石流により民家1棟が全壊し、1名が亡くなられた。既往研究¹⁾では、発生した崩壊の多くは流動化したと考えられている。しかしながら、崩壊が土石流化した土砂移動現象（本研究において崩壊型土石流と称す）は崩壊条件が土石流の流出特性に影響を及ぼすことが推定されるものの、どのような条件がどの程度影響するか未だ不透明である。

本研究は、庄原市で発生した崩壊型土石流のうち、篠堂川の上流域に位置する篠堂谷上渓流（図-1）を対象に、崩壊型土石流の流動・流出特性を現地調査およびシミュレーションにより検討したものである。

2. 災害の概要

気象庁資料²⁾によれば、災害当日である2010年7



図-1 篠堂川流域位置図

月16日広島県では、南からの暖かく湿った気流と上空の寒気の影響で大気の状態が非常に不安定となり、局地的な大雨となった。広島県災害対策本部へ16日に入った連絡では、この雨により、同市内を流れる大戸川、大津恵川のはん濫や土石流の発生があり、住宅の流出や全壊、住民の孤立があったとのことである。主な被災箇所は篠堂川沿いで4箇所、大津恵川沿いで1箇所であった。既往資料³⁾より集計したところ、篠堂川流域において、死者1名、全壊6棟、半壊5棟にのぼる被害状況であった。

災害当日の降雨状況として、7月16日に川北観測所（県所管）、大戸観測所（県所管）および庄原観測所（気象庁所管）において観測された時間雨量・累加雨量を図-2に示す。図-1に示したように、大戸観測所（県所管）は、篠堂川流域の東側に位置する観測所であり、庄原観測所は、崩壊・土石流が多発した篠堂・大津恵地区より約5km程度南に位置する庄原市街地の観測所である。災害前の降雨状況は、11日から15日までの4日間で262mm（大戸観測所）の総雨量が記録されているものの、災害発生当日は図-2に示すように15時まで無降雨であった。しかしながら、15時過ぎから18時頃にかけて集中的に降雨が発生しており、例えば大戸観測所では、16時から17時の間に時間雨量72mmのピーク値を記録し、15時過ぎから18時までの3時間の降雨量は174mmである。観測地点により降雨量の大小はあるものの、きわめて短時間に激しい雨が降った、ゲリラ的な豪雨であったことが災害当日の降雨の特性といえる。

3. 流域状況

(1) 篠堂川流域の概要

篠堂川流域における主な崩壊地を図-3に示す。図-3は、アジア航測㈱により災害後に航空レーザー計測と同時に撮影された空中写真に、国土地理院刊行の1/25,000地形図を重ね合わせて作成した。図中の崩壊地は、空中写真を判読した結果を記載したものであり、崩壊土砂の流下に伴う溪岸・溪床の侵食も含んでいる可能性がある。空中写真的判読は、レーザー計測に基づき作成された赤色立体地図も参考にした。図-3に示す崩壊地の面積をプランニメータを用いて計測したところ、家屋被害が生じた大津恵川流域内では60,500m²、同じく家屋被害（死者1名）が生じた篠堂谷上の流域内では9,600m²、それ以外の篠堂川残流域では308,000m²であり、流域内における崩壊は主に篠堂川の上流域で発生したことがわかる。また、大津恵川流域を含む篠堂川全体の流域面

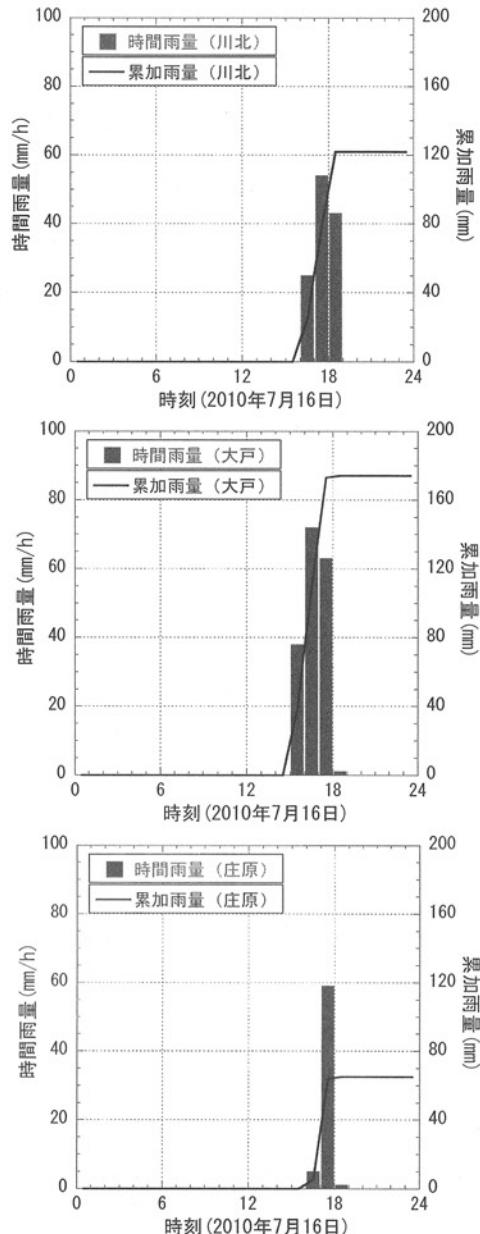


図-2 災害当日の降雨状況

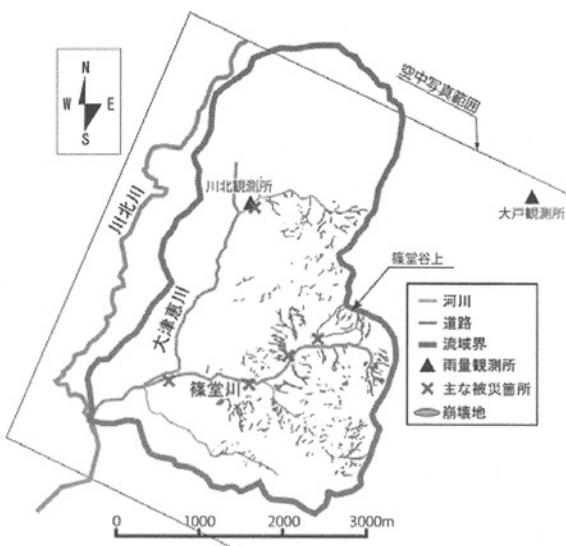


図-3 篠堂川流域内の崩壊発生状況

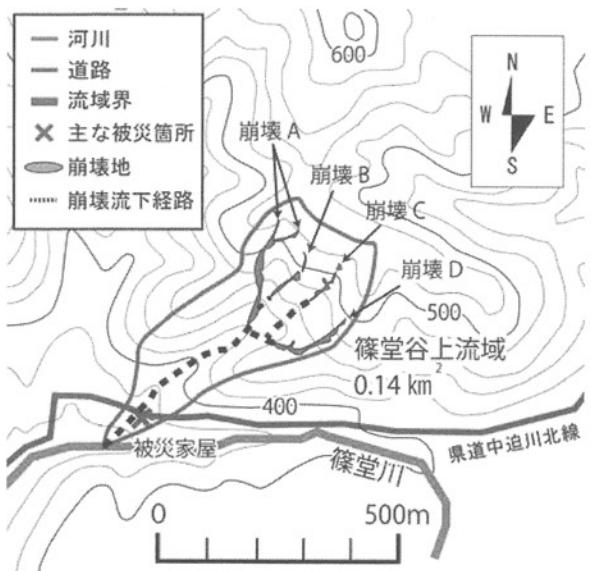


図-4 篠堂谷上における崩壊発生状況

積は 13.2km^2 であり、大津恵川の流域面積は 6.7km^2 、篠堂谷上の流域面積は 0.14km^2 であった。篠堂川流域内の地質は、流紋岩類あるいは安山岩類であり、広島県の土砂災害においてしばしば取り上げられる花崗岩ではない。また篠堂谷上流域内では砂防施設および治山施設は整備されていなかった。

(2) 現地調査

人的被害が発生した渓流である篠堂谷上を対象に現地調査を実施した。篠堂谷上の流域図を図-4に示す。また、現地状況を写真-1～写真-4に示す。

篠堂川流域では、集中的に多数の崩壊が発生したもの、個々の崩壊深は比較的浅く、1m前後の表層崩壊であることが既往研究¹⁾にて報告されている。写真-1 および写真-2 に示すように、本研究で実施した篠堂谷上の現地調査においても同様の結果であり、平均崩壊深は概ね 1m 程度であった。写真-3 は、崩壊 A および崩壊 D の流下経路の合流点の状況である。合流点における渓床は露岩していた。写真-4 は、流下経路合流点から約 200m 下流地点の侵食状況である。露岩した渓床上に角礫が堆積していた。

4. 流出特性の検討

地形図から得た標高、流域面積と現地調査結果を用い、篠堂谷上流域で発生した土石流について 1 次元流动シミュレーションを行った。流路は長方形断面で近似し、側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂は側方流入として即座に流れに取り込まれると仮定した。また、河床は流砂濃度と平衡流砂濃度の大小関係により侵食または堆積するものとした。



写真-1 崩壊地の状況（崩壊 A, 東側）



写真-2 崩壊深の状況（崩壊 A, 東側）



写真-3 流下経路合流点の状況



写真-4 合流点下流の渓床の状況

(1) 基礎式

基礎式は非定常の運動方程式と全相・固相における連続式、河床・側岸の侵食速度式を用いた。侵食速度式は高岡⁴⁾により提案された式を用いた。河床の侵食または堆積の基準となる平衡流砂量は広範な流砂形態に適用可能な流砂量式⁵⁾により決定されるものとし、流砂濃度と断面平均濃度は等しい値とするものと仮定した。

(2) 計算条件

計算に用いる諸値を表-1に示す。

a) 計算河道

計算河道の上流端は図-4中の崩壊Aと崩壊Dの流下経路の合流点（写真-3）とし、下流端は篠堂川合流点とした。初期河道は現地状況からの推定が困難であるため、河床高について、国土地理院公開の10mメッシュデータ⁶⁾を取得してTINを作成した後、作成した河道中心線上の標高を取得して計算断面の河床高とした。流路幅について、流下幅は必ずしも渓床幅と一致しないことから、流域面積から経験的に求められる笠井により提案される式⁷⁾を修正して設定した。笠井の式は、中小流域を対象として、流域面積から川幅を推定する回帰式である。本研究では、現地調査時の流水幅と渓床の侵食幅の間に収まるように、笠井式に係数を乗じて算定した流路幅を初期流路幅とした。設定した初期流路幅は、計算区間上流端で4.1m、計算区間下流端で5.0mである。

b) 境界条件

境界条件として上流端で流量、流砂濃度、水深を与えた。本研究では、上流端において静止状態の崩壊土砂量が、ある崩壊流出土砂濃度で崩壊継続時間の間に土石流に変換されると考えた⁴⁾。ここに、崩壊土砂量は見かけの体積表示であり、図-4に示した崩壊地面積9,600m²に平均崩壊深1.0mを乗じた9,600m³と、現地調査時に計測した平均侵食幅と平均侵食深より算定した流下経路における土砂量300m³とを加えた9,900m³を供給土砂量とした。上流端流量としては、雨水流量に、崩壊および流下経路で生産された土砂を含む流量を加えたものが与えられる。雨水流量は合理式より算定し、流出率は0.7とした。また、生産された土砂は飽和状態を仮定した。上流端水深は等流水深とした。

c) その他の計算条件

粒径は均一とし、現地調査より平均粒径を0.05mとした。流速係数は $\varphi = 7$ とした。雨水の河道への横流入は、計算上流端より下流の流域面積を用いて合理式より求めた流量を、計算区間長で除し、単位

表-1 計算条件

代表粒径 d	0.05 (m)
流速係数 φ	7.0
初期流路幅 B	$B = 2.0 \times 5.36 \times A^{0.37}$ (m) (A :任意地点での流域面積, km ²)
時間刻み幅 Δt	0.10 (sec)
空間刻み幅 Δx	10.0 (m)
最密充填濃度 C_*	0.65
河床堆積層厚	2.0 (m)
河床の侵食速度係数 ⁴⁾	0.01
側岸の侵食速度係数 ⁴⁾	0.001
計算区間長	370 (m)
供給土砂量	9,900 (m ³)

表-2 計算ケース

計算ケース	崩壊土砂濃度 C_0	崩壊継続時間(sec)	崩壊開始時刻
Case1	0.2	180	16:30
Case2	0.2	180	17:00
Case3	0.2	180	17:30
Case4	0.2	600	16:30
Case5	0.2	600	17:00
Case6	0.2	600	17:30
Case7	0.3	180	16:30
Case8	0.3	180	17:00
Case9	0.3	180	17:30
Case10	0.3	600	16:30
Case11	0.3	600	17:00
Case12	0.3	600	17:30
Case13	0.4	180	16:30
Case14	0.4	180	17:00
Case15	0.4	180	17:30
Case16	0.4	600	16:30
Case17	0.4	600	17:00
Case18	0.4	600	17:30

幅あたりの横流入量として与えた。篠堂谷上の主な崩壊は渓流上流部で発生しており、計算区間に相当する区間では側方斜面からの崩壊土砂の流入は少量であるため、側方からの土砂流入は無視した。

計算時間は災害当日15時から19時までの4時間とした。また、外力として篠堂谷川とほぼ同標高である大戸観測所における降雨データを与えた。崩壊の発生時刻は、既往文献¹⁾によれば17時前後には崩壊が発生していたと推測されているが、詳細な時刻は不明瞭である。そこで、本研究では崩壊発生のタイミングおよび崩壊継続時間を複数ケース仮定し、崩壊の発生条件が下流へ流出する土石流の流量および流砂濃度に与える影響についても検討した。

(3) 計算ケース

本研究で設定した計算ケースを表-2に示す。本研

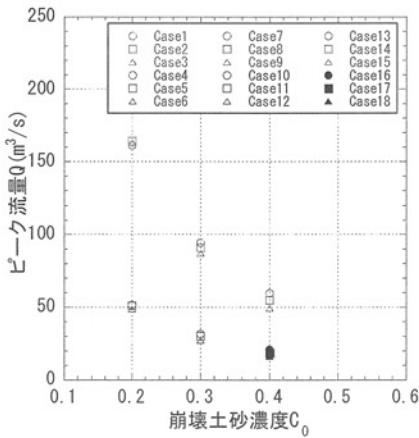


図-5 崩壊土砂濃度と下流端
ピーク流量

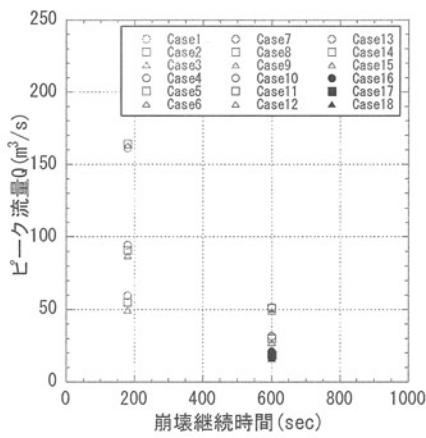


図-6 崩壊継続時間と下流端
ピーク流量

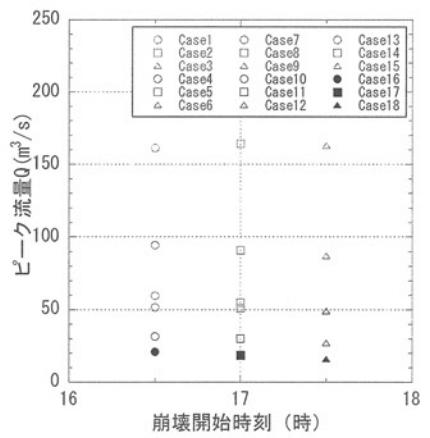


図-7 崩壊開始時刻と下流端
ピーク流量

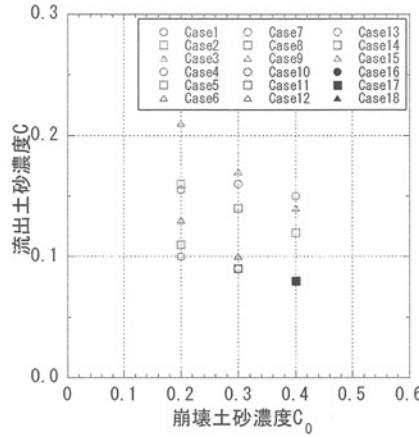


図-8 崩壊土砂濃度と下流端
土砂濃度のピーク値

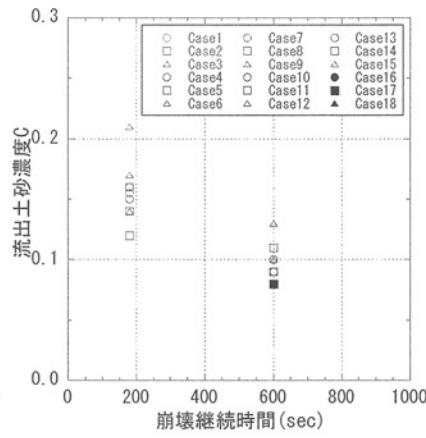


図-9 崩壊継続時間と下流端
土砂濃度のピーク値

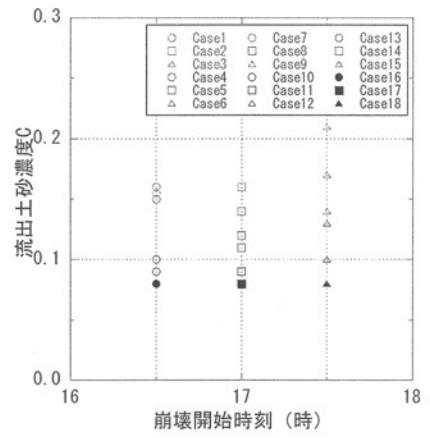


図-10 崩壊開始時刻と下流端
土砂濃度のピーク値

究では崩壊の発生状況が、下流端における土石流ピーク流量および流出土砂濃度に与える影響を検討するため、崩壊土砂の流出土砂濃度、崩壊継続時間および崩壊発生時刻のそれぞれを変化させ、複数の計算ケースを設定した。ここに、崩壊継続時間の適切な設定は困難であるが、本研究の手法では、崩壊継続時間を30secあるいは60secとした場合、上流端に供給される流量は、 $269\text{m}^3/\text{s} \sim 1,074\text{m}^3/\text{s}$ となる。等流状態を仮定すれば、流量は式(1)より推定される。

$$Q = A\varphi\sqrt{gRI} \quad (1)$$

ここに、 Q : 流量(m^3/s)、 A : 流積(m^2)、 φ : 流速係数、 g : 重力加速度(m/s^2)、 R : 径深(m)、 I : 溪床勾配

式(1)について、現地調査による計測値および計算初期河道の標高より得た溪床勾配を用いて、計算区間上流端における流積 $A=14.0\sim 16.0(\text{m})$ 、流速係数 $\varphi=7$ 、径深 $R=1.3\sim 1.5(\text{m})$ 、溪床勾配 $I=0.15$ とすれば、 $Q=135\sim 166\text{m}^3/\text{s}$ となる。ここに、水深は写真-3に示した溪床と側岸の侵食高との比高を用いており、侵食断面における満杯流量を仮定したことになる。

すなわち、当該断面における最大流量は概ね $150\text{m}^3/\text{s}$ 前後と考えられることから、崩壊継続時間 30sec あるいは 60sec のケースにおける流量を与えることは過大であると考えられる。このため、上流端への供給流量が $180\text{m}^3/\text{s}$ となる崩壊継続時間 180sec を崩壊継続時間の下限として設定した。

流出土砂濃度は、崩壊土砂が流下し計算区間上流端に到達した時点での土砂濃度である。例えば、流出土砂濃度が 0.4 であれば、飽和状態で崩壊前斜面にあった土砂が、やや濃度を小さくして計算区間上流端に流出することを意味する。既往研究¹⁾によれば、篠堂川流域において、水の吹き出し跡や湧出穴が多数確認されていることから、崩壊土塊の間隙を満たしていた水以外の清水が加わった場合を考慮し、流出土砂濃度を 0.2 としたケースも設定した。

(4) 計算結果および考察

a) 崩壊条件とピーク流量との関係

計算区間上流端に与えた崩壊条件と下流端におけるピーク流量の関係を図-5～図-7にそれぞれ示す。図-5は、崩壊土砂濃度と下流端ピーク流量との関係

を示したものであり、崩壊継続時間および崩壊発生時刻を同条件とした場合、崩壊土砂濃度が小さいほど下流端のピーク流量は大きくなることがわかる。これは、崩壊土砂濃度が小さいほど、崩壊土砂中に含まれる水分が土砂と比較して相対的に大きいため、崩壊から転化した土石流が流動性を維持したまま下流端へ流出することができるためであると考えられる。図-6は、崩壊継続時間と下流端ピーク流量との関係を示したものであり、崩壊土砂濃度および崩壊発生時刻を同条件とした場合、崩壊継続時間が短いほど下流端のピーク流量は大きくなることがわかる。本計算では、崩壊土砂量が同じである場合、崩壊時間により上流端に供給される土石流流量の最大値が決定される。図-6の結果から、上流端における土石流の流量規模が下流のピーク流量に影響を及ぼすことがわかる。図-7は、崩壊開始時刻と下流端ピーク流量との関係を示したものであり、崩壊土砂濃度および崩壊継続時間を同条件とした場合、崩壊発生時刻は下流端のピーク流量に影響を及ぼさないことがわかる。

b) 崩壊条件と流出土砂濃度との関係

計算区間上流端に与えた崩壊条件と下流端における流出土砂濃度のピーク値の関係を図-8～図-10にそれぞれ示す。図-8および図-9より、崩壊条件とピーク流量との関係と同様の傾向があることがわかる。また図-10より、崩壊開始時刻と下流端における流出土砂濃度との間には、明瞭な関係は確認できないことがわかる。

5. おわりに

本研究では、2010年7月16日に広島県庄原市において発生した土石流のうち、篠堂谷上において発生した土石流を対象に机上調査および現地調査を行った。また、それらの調査に基づいた1次元流動シミュレーションにより流出特性を検討した。

調査の結果、7月16日に発生した豪雨は、きわめて短時間における激しい降雨であったことがわかつた。また、篠堂谷上における現地調査では、発生した崩壊の平均崩壊深は1.0m程度の表層崩壊であったことを確認した。

また、篠堂谷上を対象とした1次元流動シミュレーションにより、崩壊条件が下流端における土石流のピーク流量および流出土砂濃度のピーク値に及ぼす影響について検討した。その結果、崩壊土砂の流出濃度および崩壊継続時間は、下流端における土石

流のピーク流量および流出土砂濃度のピーク値に影響を及ぼし、崩壊の発生時刻はピーク流量にほとんど影響せず、流出土砂濃度のピーク値との間には明瞭な関係性は得られなかった。

今後の課題として、篠堂谷上の谷出口に位置していた被災家屋に関するデータを収集し、本研究における計算結果と比較による、篠堂谷上において発生した土石流のピーク流量等の推定や、大津恵川流域を含む篠堂川全流域を対象とした調査・解析を行い、発生した土石流が篠堂川本川河道に及ぼした影響の検討、さらには篠堂川本川にて発生した洪水流の評価と河川沿いに位置する家屋の被害評価についての検討が考えられる。

謝辞：本研究に際して、広島県砂防課より災害後渓流内の土砂量データを提供いただいた。また、本研究は、一部、(財)河川環境管理財団の河川整備基金助成事業「広島県庄原市・山口県防府市で発生した土石流の実態と今後の対策に関する研究」(研究代表者、羽田野袈裟義)の補助のもとに実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 海堀正博、杉原成満、中井真司、荒木義則、山越隆雄、林真一郎、山下祐一:2010年7月16日に発生した広島県庄原市の土砂災害の緊急調査報告書、砂防学会誌、vol.63, No.4, pp.30-37, 2010.
- 2) 広島地方気象台Webサイト資料:平成22年7月16日の広島県庄原市の大震について、2010, http://www.jma-net.go.jp/hiroshima/siryo/saigai/sokuho_u_2010_0716.pdf
- 3) 広島県土木局土木整備部砂防課Webサイト資料:平成22年7月豪雨による広島県の土砂災害、2010, http://www.sabo.pref.hiroshima.jp/html/help/sabo/pdf/01_H22_doshasaigai.pdf
- 4) 高岡広樹:高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する研究、九州大学博士論文、2004.
- 5) 橋本晴行、朴琦璇、池松伸也、田崎信忠:急勾配移動床水路における様々な流砂形態に対する統合的流砂量式、水工学論文集、第47巻、pp.571-576、2003.
- 6) 国土地理院Webサイト:基盤地図情報ダウンロードサービス、<http://fgd.gsi.go.jp/download/>
- 7) 笠井美青:嘉瀬川ダムに流入する河川およびダムへの流入土砂について、平成9~11年度建設省・土木学会共同研究報告書、2000.

(2012.5.9受付)