

2014年8月広島豪雨災害時の土石流の衝撃力の推定

An Estimation of the Impact Force of Debris Flow in 2014 Hiroshima Case

一井康二	Koji ICHII	(広島大学大学院工学研究院)
山下宗一郎	Soichiro YAMASHITA	(元広島大学工学部)
村上雄亮	Yusuke MURAKAMI	(広島大学大学院工学研究科)
森脇武夫	Takeo MORIWAKI	(呉工業高等専門学校)
椿涼太	Ryota TSUBAKI	(広島大学大学院工学研究院)

2014年8月20日に広島市で土石流による土砂災害が発生した。本研究では、今後の土石流災害時の避難場所の検討に寄与するべく、ある被災溪流の土石流の衝撃力を推定した。衝撃力の推定にあたり、土石流の流速は湾曲部の流下断面の計測結果に基づいて推定し、土石流の密度は模擬溪流実験結果に基づいて決定した。検討の結果、被災住宅地の最上端の地点では100kPa以上の衝撃力が作用していたと推定された。

キーワード：土砂災害，土石流，衝撃力，広島豪雨災害

(IGC : C-7)

1. はじめに

2014年8月20日に広島市安佐北区、安佐南区を中心とする地域で土石流による大規模な土砂災害が発生した¹⁾。このような土石流災害は、広島市では1999年にも発生しており²⁾、土石流防災は地域の大きな課題である。

土石流防災に関しては、砂防ダムの整備といった対策のほか、雨量指標に基づく警戒・避難基準の検討^{例え3)}、個別溪流の危険度を評価するための土質調査法の検討^{例え4)}等の研究がなされているほか、土砂災害防止法に基づく警戒区域の指定⁵⁾が行われている。しかし、今回の土石流は深夜に発生した突然の豪雨⁶⁾によるものであり、事前の避難は非常に困難であったと考えられる。このような場合、それぞれの居住地域の中にある比較的堅牢で安全な住宅にとどまることが、生命を守る意味で賢明な判断となる場合も多い。

そこで、どのような住宅であれば土石流発生時に生命を守ることができるかを検討することが望ましい。このためには、土石流の衝撃力を把握する必要がある、種々の数値解析手法の開発も試みられている^{例え6)}。ただ、これらの解析手法の妥当性は、現地の被災状況や実測値との比較を通じて検証される必要がある。

以上の背景から、本研究では、広島市安佐南区緑井7丁目の溪流を対象として土石流の衝撃力を推定した。推定においては、土石流の流下断面の現地計測および現地の土砂を用いた模擬溪流実験を行い、実際の土石流の流速と密度を推定した。

2. 土石流の流速の推定

2.1 概要

土石流の衝撃力を推定するために、土石流の流速と密度が必要である。ここで、土石流の流速は、その溪流における流出土砂量に依存し、流下断面の形状等により推定できる。本研究では、**図-1**に示す広島市安佐南区緑井7丁目の溪流を対象とし、溪流出口直前の湾曲部で行った断面計測結果をもとに土石流の衝撃力を推定した。

2.2 流下断面の計測

図-2に、流下断面の計測結果を示す。侵食の状況から流下断面を仮定して計測したが、実際には兩岸の斜面でも小規模な斜面崩壊が発生しており、厳密な評価は難しい。すなわち、**図-3**に示された流下範囲は必ずしも正確ではなく、特に左岸側においては小規模な斜面崩壊が土石流の流下範囲として認識されていると考えられた。

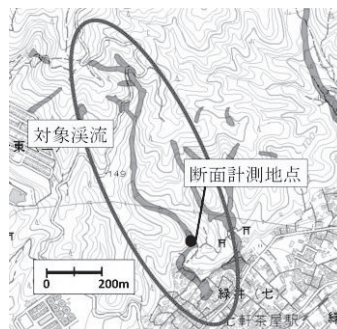


図-1 対象溪流と断面計測地点(国土地理院地図に加筆)

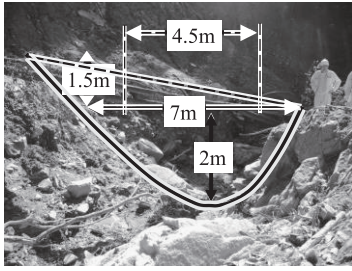


図-2 断面計測結果

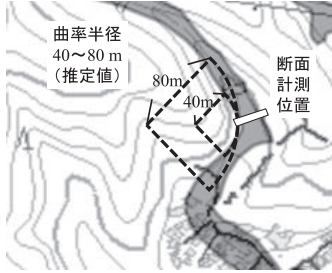


図-3 曲率半径の推定結果（国土地理院地図に加筆）

断面計測は、斜面崩壊の影響が少なく、兩岸に未侵食の部分が残る地点で行った。図からわかるように大きな岩塊も存在し、計測結果はおおよその目安として考えられたい。計測地点は湾曲部よりやや上流側であるが、湾曲の影響を受け、右岸での土石流の高さ（水深）は2m、左岸で3.5m、右岸と左岸の水位差は1.5mと推定された。また、右岸を基準に水平に流下幅を算定すると、約7mとなった。図-3と比較すると流下幅が狭いが、図-3には兩岸の斜面崩壊等の影響も含まれていることから、現地の未侵食部を考慮した計測結果のほうが妥当性は高いと考えられる。

2.3 湾曲部の水位差による流速の推定

湾曲部外側の水位上昇量は下記の式⁷⁾で示される。

$$\Delta h = 2 \frac{Bv^2}{gr_c} \quad (1)$$

これを流速 v について変形して、

$$v = \sqrt{\frac{gr_c \Delta h / 2}{B}} \quad (2)$$

なお、 Δh ：湾曲部外側の水位上昇量（ここでは、右岸が直流部と仮定して右岸と左岸の水位差）、 B ：湾曲区間の平均幅、 v ：湾曲区間の計算断面の平均流速、 r_c ：曲率半径、 g ：重力加速度である。

曲率半径は地図から、幅があるが40m～80mと推定した。図-3に曲率半径の推定状況を示す。流速の推定結果は、曲率半径 $r_c = 40\text{m}$ のとき、 $v = 8.1\text{m/s} = 29.1\text{km/h}$ 、曲率半径 $r_c = 80\text{m}$ のとき、 $v = 11.4\text{m/s} = 41.2\text{km/h}$ となった。

2.4 土石流高さによる流速の推定

警戒区域の設定に用いられる基礎調査マニュアル⁸⁾においては、流下断面における土石流高さ h から、式(3)を用いて流速を算出することができる。

$$U = \frac{h^{2/3} (\sin \theta)^{1/2}}{n} \quad (3)$$

ここで、 n ：粗度係数（=0.1：基礎調査マニュアル⁸⁾における標準値）、 θ ：土石流が流下する土地の勾配である。本論文では、土地の勾配として、対象地点の上流側200mの平均勾配を用いた。

実際に図-2で計測した流下断面における土石流高さの計測値は幅が大きいため、基礎調査マニュアル⁸⁾における土石流高さの推定式、式(4)と比較検討した。

$$h = \left\{ \frac{0.0 \ln C_* V (\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta)}{\rho B (\sin \theta)^{1/2} \tan \theta} \right\}^{3/5} \quad (4)$$

この式において、 C_* ：堆積土石等の容積濃度（=0.6：基礎調査マニュアル⁸⁾における標準値）、 V ：土石流により流下する土石等の量 (m^3)、 σ ：土石流に含まれる礫の密度 (t/m^3)、 ρ ：水の密度 (t/m^3)、 ϕ ：土石流に含まれる土石等の内部摩擦角、 B ：土石流が流下する幅 (m) である。

土石流により流下する土石等の量は実際の流出量の推定値⁹⁾に相当する量（基礎調査マニュアルに基づいて事前に推定される値 V_0 の2倍）とし、礫の密度と水の密度は基礎調査マニュアルに基づいて、それぞれ、 2.6t/m^3 、 1.2t/m^3 とした。流下幅 B は基礎調査マニュアルに基づいて、ピーク流量（基礎調査マニュアルに基づいて土石流により流下する土石等の量の1%と仮定）と流下断面に以下の関係があると仮定して求めた。

$$Q = \frac{1}{n} \left(\frac{A}{S} \right)^{2/3} (\sin \theta)^{1/2} A \quad (5)$$

ここで、 Q ：ピーク流量 (m^3/s)、 A ：土石流流下断面積 (m^2)、 S ：潤辺 (m) である。すなわち、水面が水平であると仮定し、流下断面積と潤辺の関係を現地の流下断面の計測結果から求めると、ピーク流量に応じて残る未知量である流下断面積が定まり、水面が水平であるという仮定から流下断面形状に応じた流下幅が求まる。

以上より、土石流の流下幅は $B = 8.68\text{m}$ と推定され、このとき、土石流高さが $h = 2.34\text{m}$ 、土石流流速が $v = 8.68\text{m/s} = 31.3\text{km/h}$ となった。流下高さは、ほぼ実際の流下断面形状と整合しており、流速は、湾曲部の水位差から推定した流速ともおおむね整合した。

当該溪流での実際の流出土砂量が事前推定値 V_0 のほぼ2倍と推定されていることと、流出土砂量を事前推定値 V_0 の2倍と想定した際の流速推定値が水位差からの推定値と整合することから、上記推定値の妥当性は高いといえる。

3. 土石流の密度の推定

3.1 概要

警戒区域の設定における基礎調査マニュアル⁸⁾においては、土石流密度 ρ_d の推定式は、式(6)⁸⁾で与えられる。

$$\rho_d = \frac{\rho \tan \phi}{\tan \phi - \tan \theta} \quad (6)$$

ここに、 ρ_d : 土石流の(飽和)密度、 ρ : 土石流に含まれる水の密度 (t/m^3)、 ϕ : 土石流に含まれる土石の内部摩擦角(度)、 θ : 土石流が流下する土地の勾配(度)である。この推定式は、長大斜面の安定計算により、土塊が安定を保つことができる臨界条件として誘導されるものである。なお、 ρ_d は飽和密度であって、乾燥密度でないことに留意されたい。

しかし、上記の推定式は、理想化された長大斜面の安定計算に基づくものであって、実際の土石流の状況や、すべての土質に対して適用可能かどうかは定かではない。そこで、本研究では、水が流れている模擬溪流に土試料を流すことで土石流を再現し、流下する土石流をサンプリングして、その密度を計測して推定式の適用性を確認した。以下、この実験を模擬溪流実験と呼ぶ。

3.2 模擬溪流実験の条件設定

図-4に実験装置の全体写真を示す。溪流の傾斜角は、上部と下部の台の高さで調節し、傾斜計を用いて傾斜角を調べた。溪流の上部には蛇口に直結しているホースが接続されており、蛇口の開度によって流量を調節できる。



図-4 模擬溪流実験装置

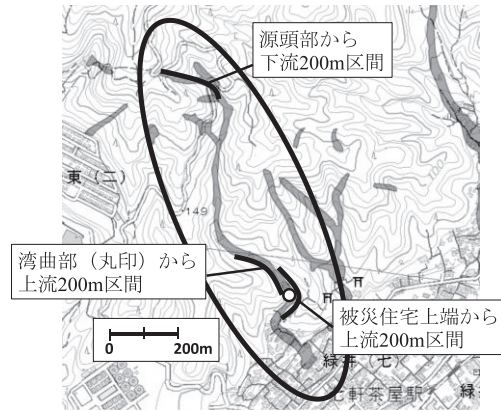


図-5 斜面勾配の算出区間(国土地理院地図に加筆)

本実験では緑井7丁目の溪流を対象として、模擬溪流の条件を設定することとし、傾斜角は 21° 、 14° 、 9° の3パターンを設定した。それぞれ、緑井7丁目の溪流について、源頭部からその下流200m区間の平均勾配、流速推定地点よりその上流200m区間の平均勾配、この溪流の下流で被災した住宅地の最も上流にある住宅からその上流200m区間の平均勾配である。図-5にその概略図を示す。

土試料の初期含水比は全てのケースにおいて、土試料が流下できる範囲の値として、25%に設定した。勾配や土質の違いによって崩壊時の含水比は異なると考えられるので、実際の土石流発生条件との関係性は明確ではない。今後の課題である。

模擬溪流の水量は、230mL/sと設定した。これは、傾斜角 21° のとき、流速が約170cm/sとなり、含水比25%の投入試料が模擬溪流のほぼ半分(85cm)の区間に均等に広がった場合に、基礎調査マニュアルに基づく土石流濃度の推定値(内部摩擦角35度を仮定し、上記の実験条件では $C_d = 0.54$)が得られるように設定した。傾斜角 14° および 9° については、上記の流量をそのまま適用した。溪流の水量や流速の影響の検討は、今後の課題である。

3.3 土試料の現地採取

対象溪流において適切な土試料を入手できなかったため、近隣の広島市八木3丁目の2地点(阿武の里団地の溪流・堆積岩由来の土と光廣神社裏の溪流・まさ土)で土を採取し、その2種類の土試料について実験を行った。図-6に土試料の採取地点、図-7に採取試料の粒径加積曲線を、図-8に採取地点の状況を示す。

図-7からわかるように、堆積岩由来の溪流の土砂にはシルトが多く含まれており、まさ土の溪流の土砂には砂や礫が多く含まれている。なお、対象とした緑井7丁目の溪流は源頭部も踏査して確認したところ、まさ土の溪流であり、以下の実験において、堆積岩由来の土の実験結果はあくまで比較のための参考情報である。

3.4 実験手順

実験手順は下記のとおりである。所定の水量を模擬溪流に流し、模擬溪流の上部に土試料を投下する。試料の投下は、容器をさかさまにすることにより行い、速やかな投下を行う。水と混ざりながら流下した土試料を、溪流の下部（末端からおよそ 20cm 上流付近）でモールドを用いてサンプリングする。そして、土石流の密度を下記の手順で算定した。

- ① サンプリングした試料のモールドごとの質量 ($M_{\text{試料+モールド}}$: g) を計測する。この段階ではモールドは満杯になっておらず、サンプリング試料の体積は不明である。
- ② メスシリンダーにモールドの体積分の水 (200mL) を準備する。
- ③ ②の水を試料が入ったモールドに、ぎりぎりまで注ぐ。
- ④ メスシリンダーに残った水の体積 ($V_{\text{試料}}$: mL) を計測する。これはサンプリングした試料の体積に相当する。
- ⑤ モールド内の試料と水を捨て、水で洗い乾燥させる。
- ⑥ モールドの質量 ($M_{\text{モールド}}$: g) を計測する
- ⑦ 式(7)より密度 ρ を求める。

$$\rho = \frac{M_{\text{試料+モールド}} - M_{\text{モールド}}}{V_{\text{試料}}} \quad (7)$$

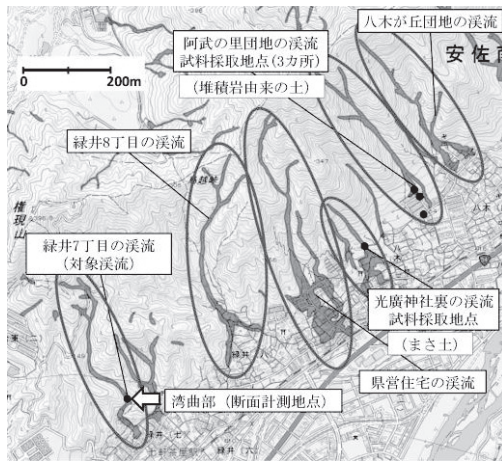


図-6 土試料の採取地点と対象溪流
(国土地理院地図に加筆)

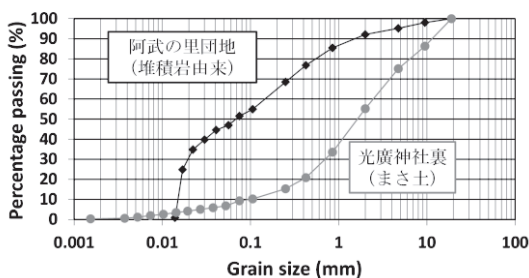


図-7 採取試料の粒径加積曲線



(a) まさ土 (光廣神社裏)



(b) 堆積岩由来の土 (阿武の里団地)

図-8 土試料採取地点の状況

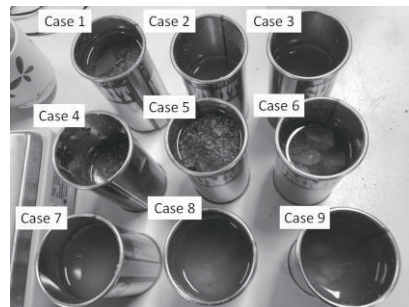


図-9 模擬溪流実験におけるサンプリング試料 (まさ土)

3.5 実験結果

図-9 にまさ土の実験ケースのサンプリング試料の写真を示し、表-1 に全体の実験結果を示す。同じ条件であっても密度のばらつきは大きい。図-9 に示すモールドの中身をよく観察すると、比較的大きな粒径の石が採取された実験ケースやそうでない実験ケースがある。また、土試料を模擬溪流に投下した時に、土試料がうまく水と混ざりきれず、塊のままサンプリングされた可能性がある。このような要因から、同じ条件でもばらつきが大きく出たと考えられる。しかし、実際の土石流においても、巨石が含まれていたり、一気に土塊が流されたりして、均一な状態で土石流が流れるとは考え辛い。ここでは、ばらつきは大きいものの、平均値により議論することとする。実験結果を基礎調査マニュアル⁸⁾における土石流密度 ρ_d の推定式: 式(4)による値と共にグラフにプロットしたものを図-10 (まさ土) と図-11 (堆積岩由来の土) に示す。

表-1 模擬溪流実験の実験結果一覧

Case	土の種類	傾斜角	モールド+土+水の質量	土+水の体積	モールドの質量	土+水の質量	密度	平均密度	単位体積重量	平均単位体積重量
		°	g	mL	g	g	t/m ³	t/m ³	kN/m ³	kN/m ³
1	まさ土	21	355.61	162	52.05	303.56	1.874	1.611	18.38	15.81
2			197.80	94	51.73	146.07	1.554		15.24	
3			216.56	117	52.08	164.48	1.406		13.79	
4		14	232.59	97	51.70	180.89	1.865	1.782	18.29	17.48
5			358.60	174	51.89	306.71	1.763		17.29	
6			293.86	141	51.75	242.11	1.717		16.84	
7		9	251.95	141	51.75	200.20	1.420	1.492	13.93	14.64
8			283.48	153	51.61	231.87	1.515		14.87	
9			267.45	140	51.60	215.85	1.542		15.12	
10	堆積岩由来	21	199.74	109	52.13	147.61	1.354	1.507	13.28	14.78
11			230.19	113	51.95	178.24	1.577		15.47	
12			201.53	94	52.10	149.43	1.590		15.59	
13		14	213.14	106	51.85	161.29	1.522	1.422	14.93	13.95
14			279.25	158	51.84	227.41	1.439		14.12	
15			231.87	138	51.82	180.05	1.305		12.80	
16		9	235.67	144	51.74	183.93	1.277	1.307	12.53	12.82
17			157.27	88	52.04	105.23	1.196		11.73	
18			290.75	165	52.05	238.70	1.447		14.19	

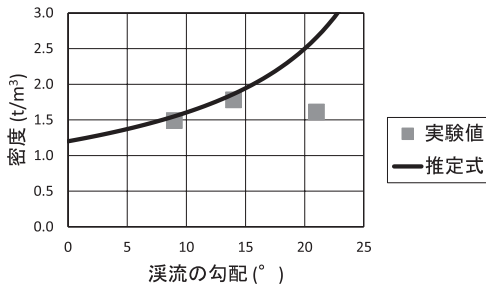


図-10 密度の実験値と推定式の比較（まさ土）

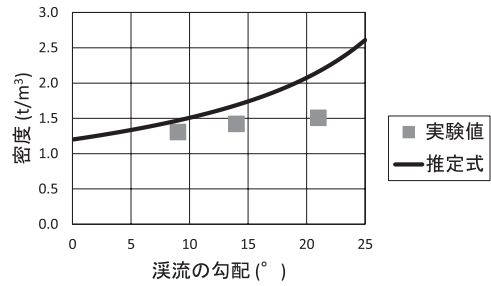


図-11 密度の実験値と推定式の比較（堆積岩由来の土）

推定式を適用する際に、内部摩擦角 ϕ に関しては、まさ土の場合は 35.0 度、堆積岩由来の土の場合は 40.8 度を適用した。この理由は、広島県では内部摩擦角の値として一般に 35 度が用いられていること、平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団の調査報告書⁹⁾に阿武の里団地の溪流（本実験における堆積岩由来の土を採取した溪流）において採取された土試料（ただし源頭部で採取）の内部摩擦角が 40.8 度（暫定値）と記載されていたことである。なお、供試体作成時の密度の設定が悩ましく、実験試料を用いた要素試験は行っていない。今後の課題である。

まさ土と堆積岩由来の土のどちらにおいても、溪流の勾配が小さい範囲では、実験値は推定式による値とおおむね一致した。また、溪流の勾配が小さくなるほど、密度が小さくなる傾向にある。なお、まさ土試料の勾配 21°における実験結果は、推定式の値と大きく異なる結果であった。この理由としては、溪流源頭部に相当する急勾配のため、推定式の適用範囲外であったと考えられる。

4. 土石流の衝撃力の推定

4.1 溪流湾曲部における衝撃力の推定

推定した土石流の流速と密度から、基礎調査マニユア

ルにおける式(8)⁸⁾を用いて衝撃力を算出した。

$$F_d = \rho_d U^2 \quad (8)$$

衝撃力の算出においては、流速推定値として、溪流湾曲部での流速推定値（実際に発生した流出土砂量：事前推定値 V_0 の 2 倍に基づくもので曲率半径 $r_c=40\text{m}$ とした推定値とほぼ等しい）に加えて、曲率半径 $r_c=80\text{m}$ に基づく流速推定値、現行の基礎調査マニュアルに基づく流出土砂量（事前推定値 V_0 ）に基づく流速推定値の 3 種類を用いた。また、密度に関しては、湾曲部での勾配（14 度）における土石流密度の値（推定式の値）を用いた。表-2 に結果を示す。衝撃力の推定値にはかなり幅があるが、木造住宅が全壊するとされる衝撃力（例えば 30 kPa）⁹⁾を遥かに上回っており、また、鉄筋コンクリートの建物も大きな被害が出る可能性がある値である。これは、対象とした地点が住宅地よりも上流で、勾配が急な地点であることも影響している。

4.2 被災住宅地の最上端における衝撃力の推定

基礎調査マニュアル⁸⁾における土石流の流速と密度の推定式（式(3)および式(4)）には、パラメーターとして、土石流が流下する土地の勾配 θ が含まれている。従って、勾配

表-2 湾曲部における衝撃力の推定値

		流速 (km/h)		
		断面計測 (rc=80)	推定式 (1V ₀)	推定式 (2V ₀)
密度 ρ_d (t/m ³)	1.86	244.1	80.8	140.9

Unit: kN/m²

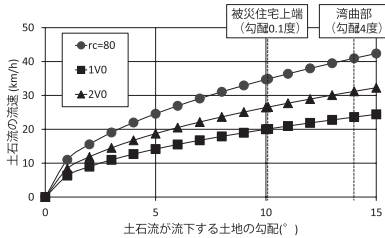


図-12 勾配による流速の変化

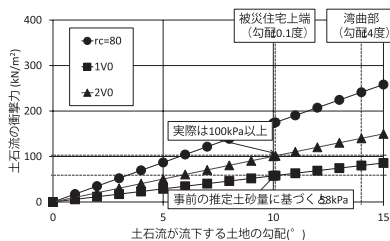


図-13 勾配による衝撃力の変化

θ が小さくなると、密度と流速が減少し、結果として土石流の衝撃力も減少する。

土石流の衝撃力が、勾配の変化によりどのように変化するのかを以下に示す。勾配の変化による密度の変化は既に図-10 に示した。図-12 は勾配の変化による流速の変化である。勾配 14 度における密度(まさ土の推定値)と流速の値(3 種類の推定値)を基準として算出した。そして、衝撃力と勾配の関係を図-13 に示す。勾配が小さくなるにつれて衝撃力も小さくなっていく。流速の推定値のばらつきが大きく、実際に被災地に作用した衝撃力を正確に推定することは難しいが、少なくとも、実際に発生した流出土砂量(事前推定値 V_0 の 2 倍)に基づく流速推定値以上の土石流流速であったと考えられ、このとき、図-13 より、被災住宅地の最上端の勾配(10.1 度)では、約 100kPa 以上の衝撃力が作用していたと推定される。

5. 結論

本研究では、2014 年 8 月広島豪雨災害時における緑井 7 丁目の溪流を対象として、土石流の衝撃力を推定した。衝撃力の推定にあたり、土石流の流速は湾曲部の流下断面の計測結果に基づいて推定し、土石流の密度は模擬溪流実験結果に基づいて決定した。検討の結果、警戒区域の設定における基礎調査マニュアル⁸⁾における土石流密度 ρ_d の推定式に一定の適用性があることを確認し、被災住宅地の最上端

の地点では 100kPa 以上の衝撃力が作用していたと推定された。

謝辞

流出土砂量の推定については、地盤工学会中国支部広島地域地盤工学セミナーの場において、復建調査設計株式会社・中藪恭介氏、株式会社日航コンサルタント・木下三郎氏の助言を得た。また、土石流の密度の推定式の根拠については、広島大学大学院工学研究院・土田孝教授のご教示を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会, 地盤工学会: 平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書, 2014.
- 2) 福岡捷二, 渡邊明英: 6 月 29 日集中豪雨による広島県土砂災害, 土木学会誌第 84 巻第 10 号, pp.54-58, 1999.
- 3) 中井真司, 佐々木康, 海堀正博, 森脇武夫: 警戒・避難のための雨量指数の改良(危険雨量指数 R_f の再吟味と R' の提案), 広島大学大学院工学研究科研究報告, Vol.53, No.1, 2004.
- 4) 川端昇一, 土田孝, 中川翔太, 花岡尚: 現場貫入試験による個別溪流・斜面調査に関する研究, 地盤工学研究発表会講演集, Vol.48, No.998, 2011.
- 5) Uchida, T., Nishimoto, H., Osanai, N. and Shimizu, T.: Countermeasures for Sediment-related Disasters in Japan using Hazard Maps, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp.46-53, 2009.
- 6) Carter M., Pedro, A., Gregory, R., and Peter, M.: Avalanche and landslide simulation using the material point method: flow dynamics and force interaction with structures, *Computational Geosciences*, Vol.18, Issue 5, pp. 817-830, 2014.
- 7) 国土技術政策総合研究所: 土石流・流木対策設計技術指針解説, 国総研資料第 365 号. <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0365.htm> (参照 2015-06).
- 8) 広島県土木局土木整備部砂防課: 広島県基礎調査マニュアル(案)(土石流編), 2009.
- 9) Kang, H. and Kim, Y.: Study of physical vulnerability curves based on characteristics of damage to buildings by debris flow, *Proceedings of International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE2014)*, pp.188-189, Busan, Korea, 2014.

(2015 年 6 月 22 日 受付)