

土石流の衝撃力に着目した新しい土砂災害警戒区域の指定法の提案

A Proposal of a New Debris Flow Warning Areas from the View Point of the Impact Force

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)
中麩恭介	Kyosuke NAKAYABU	(復建調査設計株式会社)
木下三郎	Saburo KINOSHITA	(株式会社日航コンサルタント)

平成 26 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。この災害では、都道府県が定める土砂災害特別警戒区域を大きく越える場所にまで土石流の被害が及んだため、現行の警戒区域の指定法には不十分な面があると考えられる。そこで本研究では、土石流の衝撃力に基づく警戒区域の指定法の可能性を検討した。まず、衝撃力の推定に必要な土石流流量の推定における課題を示した。次に、ある溪流を対象に、住宅の破壊状況と推定した土石流の衝撃力の関係を調べ、衝撃力に基づく新たな警戒区域の設定法のイメージを示し、今後の検討課題を明らかにした。

キーワード：土石流，衝撃力，土砂災害防止法，警戒区域

(IGC : C-7)

1. はじめに

平成 26 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大規模な土石流災害が発生した¹⁾。死者は 74 名にも及び、現状の防災対策が不十分であることが明らかとなった。

土石流防災に関しては、砂防ダムの整備といったハード対策には予算等の制約があり、雨量指標に基づく警戒・避難基準の検討^(例えば 2)、個別溪流の危険度を評価するための土質調査法の検討^(例えば 3)等の研究に基づく、ソフト対策が重視されている。特に、広島県で 1999 年に発生した土砂災害を受けて、土砂災害防止法に基づく警戒区域・特別警戒区域の指定⁴⁾が全国的に具体的なソフト対策として実施されている。

土砂災害防止法に基づく警戒区域の指定においては、都道府県は基礎調査を行う。そして、土砂災害の恐れのある区域を警戒区域（イエローゾーン）、特に危険な場所（建築物に損壊が生じ、住民等の生命または身体に著しい危害が生じるおそれがある地域）を土砂災害特別警戒区域（レッドゾーン）として指定している。

しかし、平成 26 年 8 月豪雨による広島市の土砂災害では、（警戒区域・特別警戒区域の指定の遅れの問題はともかく、指定済みの地域においても）土砂災害特別警戒区域を大きく越える場所にまで土石流の被害が及んだ¹⁾。このことから、現行の方法では適切な区域指定ができていないという問題があると考えられる。

この原因として、1 つの溪流で複数回の土石流が発生し、想定よりも流出土砂量が多かったことや、図-1 に示すように、先発の土石流の堆積土砂により、後発の土石流は初期の地形から想定される流下方向を逸れて流下したことなどが挙げられている¹⁾。

本研究では、以上の観点から、土石流の流下方向にはこだわらず、土石流の衝撃力のみに基づく新しい警戒区域の設定法を検討する。ただし、従来の警戒区域・特別警戒区域の指定法を批判するわけではなく、特別警戒区域（レッドゾーン）ほど著しい危害のおそれがあるわけではないものの、警戒区域（イエローゾーン）よりは危害のおそれがある注意を要する区域を指定しようとするものである。この観点から、本研究では新しい警戒区域をオレンジゾーンとよぶことにする。

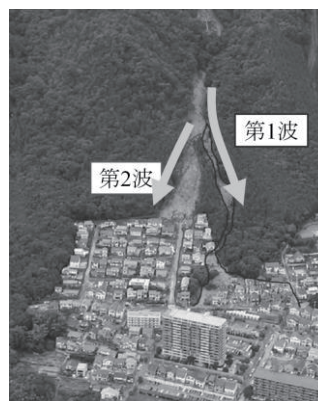


図-1 後続の土石流の流路変化の例¹⁾に加筆

2. 土石流の衝撃力の推定における課題

2.1 概要

警戒区域の設定における基礎調査マニュアル⁵⁾においては、土石流の流速と密度から、式(1)によって衝撃力を推定する。

$$F_d = \rho_d U^2 \quad (1)$$

この数式が正しいとすると、密度に比べて流速は2乗で衝撃力に寄与するため、流速の推定精度が非常に重要となる。

2.2 流速の推定

基礎調査マニュアル⁵⁾においては、流下断面における土石流高さ h から、式(2)を用いて流速を算出する。

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

ここで、 n : 粗度係数、 θ : 土石流が流下する土地の勾配である。また、土石流高さ h は流量と関係しており、式(3)を用いて算出する。

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

この式において、 C_* : 堆積土石等の容積濃度（無次元量）、 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 : 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等の内部摩擦角、 B : 土石流が流下する幅（ m ）である。対象地点の土石流の流動中の土砂濃度 C_{d0} が式(4)で対象地点の地形に応じて定まり、式(5)によって求まる対象地点の土石流ピーク流量 Q_{sp0} の関数として、対象地点の土石流高さが算出される。

$$C_{d0} = \frac{\rho \tan \theta_0}{(\sigma - \rho) (\tan \phi - \tan \theta_0)} \quad (4)$$

$$Q_{sp0} = \frac{0.01}{C_{d0}} C_* V_0 \quad (5)$$

ここで、 Q_{sp0} : 対象とした地点での土石流ピーク流量、 V_0 : 対象とした地点において土石流により流下する土石等の量（ m^3 ）（溪流の出口では土砂発生量と等しくなる）、 C_{d0} : 土石流の流動中の土砂濃度（無次元量）、 θ_0 : 対象とした地点の上流 200 m 区間平均勾配、であり、その他の式(4)および式(5)における記号は式(3)と同じである。簡単に言えば、土石流により流下する土石等の量（流出土砂量）の 1%が

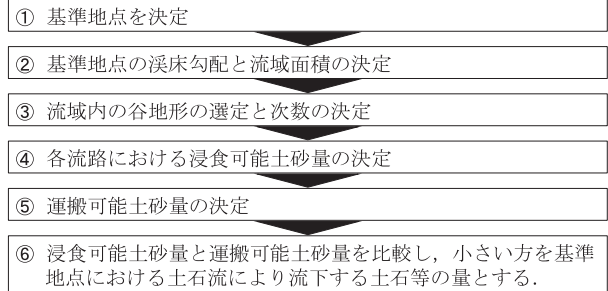


図-2 基準地点における流出土砂量の推定フロー⁵⁾

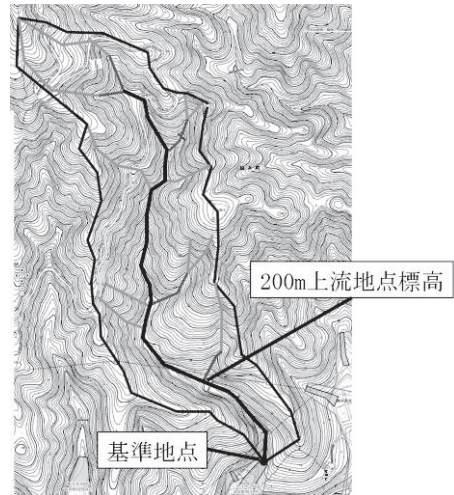


図-3 浸食可能土砂量の推定

ピーク流量であると仮定されている。

粗度係数の妥当性はさておいたとしても、土石流の流量、（正確には土石流のピーク流量）の推定精度が、流速、したがって、衝撃力算定時の重要な要素となる。

なお、種々の土質条件・雨量条件に対して、この仮定が妥当であるかどうかは検証を要する。特に、今回の広島災害のような短時間の豪雨による発災のパターンを考えた場合、ピーク流量は既往の経験式の範囲を超えて大きくなる可能性があると思われる。

2.3 流出土砂量の推定

基礎調査マニュアルにおける流出土砂量の推定は、図-2に示す手順で、対象溪流の谷地形の選定と谷次数の判定に基づいて行われる。以下、緑井7丁目の溪流を対象に流出土砂量を推定した結果を示す。

基準地点の場所は、実際に広島県が定めている地点を土砂災害警戒区域・特別警戒区域図⁶⁾から読み取った。基準地点の溪床勾配とは、基準地点から上流 200m 区間の平均勾配であり、基準地点とその上流 200m 地点の標高から読み取った。流域面積も同様に地図より読み取った。ここでは、図-3に示す土砂災害ポータルひろしまの標準地図⁶⁾を用いた。結果、溪床勾配は 10.76 度、流域面積は 0.16 km^2 となった。流域内の谷地形の選定には、図-3の地図を用い

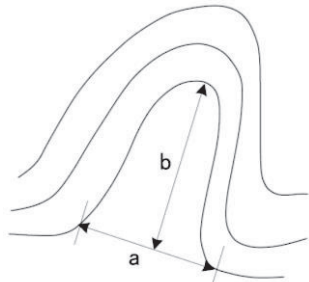


図-4 谷次数の決定⁵⁾

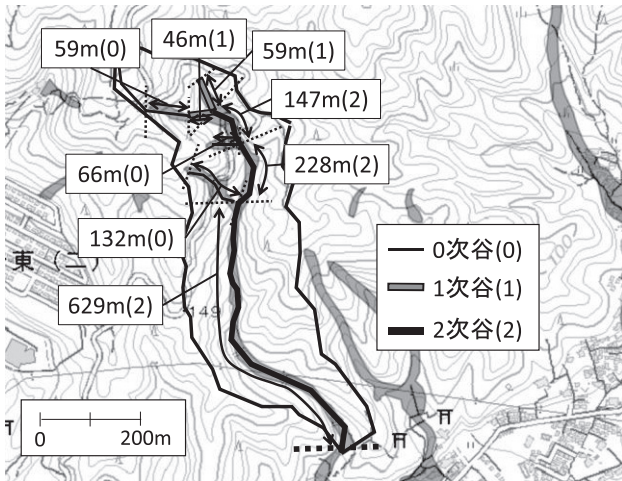


図-5 基準地点上流の流路延長の判読⁷⁾に加筆

た。谷次数とは、図-4⁵⁾に示すような地形において、 $a > b$ となるものを0次谷、そうでないものを1次谷とする。また、1次谷と1次谷が交わる地点より下流を2次谷とする。

結果は図-5に示した通りであり、延長に追記した(0)が0次谷、(1)が1次谷、(2)が2次谷を示す。基礎調査マニュアル⁵⁾では、表-1のように谷次数に応じて浸食断面積が定められており、流路延長と浸食断面積を乗じることで浸食可能土砂量を推定する。なお、浸食可能土砂量とは、最も多い流出土砂量となる1経路の値となる。結果、本溪流では、 $6,979 \text{ m}^3$ となった。一般的に運搬可能土砂量と浸食可能土砂量を比較すると、浸食可能土砂量が小さくなることが多く、対象溪流においても、浸食可能土砂量が運搬可能土砂量より小さい。運搬可能土砂量の算出仮定は省略する。よって、この溪流における流出土砂量は $6,979 \text{ m}^3$ となった。

しかし、災害発生時、実際には基礎調査マニュアル⁵⁾に基づく想定値の2倍近くの土砂が流出したと考えられた¹⁾。この理由を分析するため、国土地理院の土石流発生箇所の写真判読図⁷⁾をもとに図-5のように各流路延長を求めた。図に示されている数字は、1つ手前の枝分かれ、または谷次数が変わる地点からの距離を示す。そして、写真判読図における土石流発生箇所が、基礎調査マニュアル⁵⁾で想定される浸食断面積で浸食されたと仮定した時の流出土砂量の推定結果を表-2に示す。浸食可能土砂量は $7,492 \text{ m}^3$ と

表-1 基礎調査マニュアルにおける浸食深と浸食幅⁸⁾

	浸食深	浸食幅
0次谷	1.1	3.5
1次谷	1.3	4.5
2次谷	1.5	4.5
3次谷	1.9	4.5

表-2 緑井7丁目の土石流の流出土砂量の試算(基礎調査マニュアルに基づく浸食深と浸食幅)

谷次数	長さ(m)	浸食断面(m ²)	浸食可能土砂量(m ³)
0字谷	284	3.85	1093
1字谷	105	5.85	614
2字谷	857	6.75	5785
		合計	7492

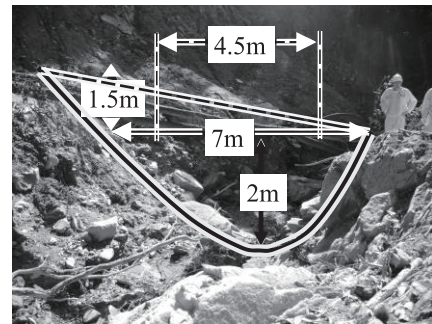


図-6 流下断面の計測例

推定された。この値は、実際に発生した土砂量の推定値 $13,100 \text{ m}^3$ よりも小さい。つまり、流出土砂量の推定値が正しいとすると、浸食断面積はマニュアルによる推定のおよそ1.75倍となる必要があり、土石流が2波・3波と発生したことだけでは説明がつかない。したがって、各種の土質条件や降雨条件に応じた浸食断面積(浸食深および浸食幅)の評価方法の検討が、土石流の流量評価・衝撃力の算定において必要となる。しかし、浸食深は基盤層の風化度に、浸食幅は流量(雨量)に依存する可能性もある。より多くの事例データの蓄積に加えて、現地踏査時の適切な地盤調査法の開発なども必要であろう。

3. 衝撃力に基づく警戒区域設定の試算と課題

3.1 概要

研究対象とした緑井7丁目の土石流には湾曲部があり、湾曲部の流下断面の形状を計測すると、図-6のようになった。そして、この溪流に対して、流出土砂量が基礎調査マニュアル⁵⁾に基づく想定値の2倍(調査報告書で示された推定値¹⁾)として計測した流下断面形状にあてはめると、土石流の流下幅が $B = 8.68 \text{ m}$ 、土石流高さが $h = 2.34 \text{ m}$ となり現地の状況と整合した。そして、この時の土石流の流速は、 $v = 8.68 \text{ m/s} = 31.3 \text{ km/h}$ と推定された。流速の算定は

式(2)～式(5)に対して、基礎調査マニュアル⁵⁾の標準値($\varphi=35^\circ$, $n=0.1$, $C^*=0.6$)と密度推定値($\rho=1.2$, $\sigma=2.6$)を用いた。この推定値の妥当性は機会をあらためて論ずることとし、本論では、上記の推定値を暫定値として正しいとした場合の、警戒区域設定のイメージを示し、課題を明らかにする。

3.2 衝撃力の推定

基礎調査マニュアル⁵⁾では、土石流の流速と密度の推定式の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 θ が変化すると密度と流速が変化し、結果として土石流の衝撃力も変化する。そこで、上述の湾曲部の流速を基準値として、勾配 θ を変化させ、密度と流速の変化に伴う衝撃力の変化を求めた。結果を図-7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。この衝撃力の推定値の妥当性は慎重に議論する必要があるが、本論文では暫定値として採用する。

3.3 被災状況の確認

研究対象とした溪流の下流部について、土石流発生前後に撮影された航空写真⁷⁾を比較し、被害状況を確認した。図-8に土石流の主な流路と被災した住宅を示す。白抜きの□で示した住宅は土石流が発生した時に全壊したもの、△で示した住宅は災害発生後に取り壊されたものを示している。つまり、被災状況をまとめると、土石流は山から流下してきて、右岸側の地形と前方の住宅にぶつかり、流下方向が左へと変わった。進路を変える時に直撃を受けた付近が最も被害が大きく、道路に面している3軒(1列目:Aの列)は全壊した。さらに、その背後にある2軒(2列目:Bの列)と、その2軒の背後にある1軒(3列目:C)は、最終的に取り壊しとなっていることから、重大な被害を受けたと推測される。左に方向転換し流下した後、流路正面にある住宅(1, 2列目:D, E)を押し流した。その住宅の背後で駐車場を隔てた位置にあった住宅(3列目:F)も最終的に取り壊しとなった。なお、住宅Fが土石流の直撃を受けたのか、前面住宅の背後となり直撃を免れたのかの判断は難しいが、前面に駐車場があることを踏まえ、後述の検討では直撃を受けたものとして取り扱った。

3.4 被災状況と流路勾配

図-9は土石流の流路のまとめである。Route Aは山から流れてきた土石流が進路を変えずに直進する流路であり、Route Bは住宅直撃後に左折した流路を示している。Route AとRoute Bのそれぞれの縦断面図と被災した住宅の位置、その被災状況、住宅の上流200m区間の平均勾配を示す。

×は土石流が発生した時に全壊した家、△は土砂災害後に取り壊しになった家、○は最終的に残っている家を表す。このような土石流の被害を受けた住宅に、どの程度の衝撃力が作用していたのかを、それぞれの住宅の上流200m区間の勾配から図-7を用いて推定する。

図-7に示した衝撃力の推定値が正しいと仮定する。当初の土石流流路(Route A)は土石流の第1波に相当する。このとき、図-7より、Route AのX地点(住宅A)における衝撃力は94kPaと推定される。土石流の流量や地形にもよると考えられるが、本事例では住宅を直撃した土砂は減速して堆積し、後続の土石流は左に変化した流路(Route B)をとった。これは、土石流の第2波に相当すると考えられるが、後続の第2波や第3波の衝撃力も第1波と同様に算出できると仮定する。このとき、Route BのY地点(住宅D)における衝撃力は73kPa、Z地点(住宅F)における衝撃力は52kPaと推定された。

ここで、既往の研究における土石流の衝撃力と建築物の破壊の程度との関係と比較して妥当性を検討する。例えば、30kPa以上の土石流衝撃力で、木造住宅が部分的あるいは全体的に崩壊して避難および再建が必要となる、という知見⁸⁾がある。この点について、X地点(住宅A)、Y地点(住宅D)の被災状況は即時全壊であり、整合している。Z地点(住宅F)では、被災直後時点で全壊していないが、避難と再建が必要な状況であり、整合しているといえる。

以上をまとめると、X地点(住宅A)とY地点(住宅D)の被災状況から、70~100kPa程度の土石流の衝撃力が作用する場所において、土石流の流下方向に対して直線的な位置関係の木造住宅に対し、1列目は非常に危険であり全壊の可能性が高い。2, 3列目は、住宅の全壊の恐れは小さいが、大きな被害は受けるため1次的な避難場所として2階にとどまるといった判断は安全とはいえない。4列目以降は、前面の住宅に守られており、豪雨下での避難が困難な場合には2階にとどまるなどの避難行動が可能であると考えられる。Z地点(住宅F)の被災状況からは、50kPa程度の土石流の衝撃力が作用する場所において、土石流の流下方向に対して直線的な位置関係の木造住宅に対し、1列目は非常に危険であるが、2列目以降は、前面の住宅に守られており、一時的な避難場所の機能を果たしえる可能性がある。

また、既往の知見で衝撃力30kPaで木造住宅が全壊すると示されている⁸⁾が、この衝撃力は、図-8では勾配3.9°に相当する。この時の被災住宅背後に位置する住宅の被災可能性については、議論できるデータはないものの、50kPaの衝撃力の際と同様に、1列目は非常に危険であるが、2列目以降は、前面の住宅に守られていると考えられる。

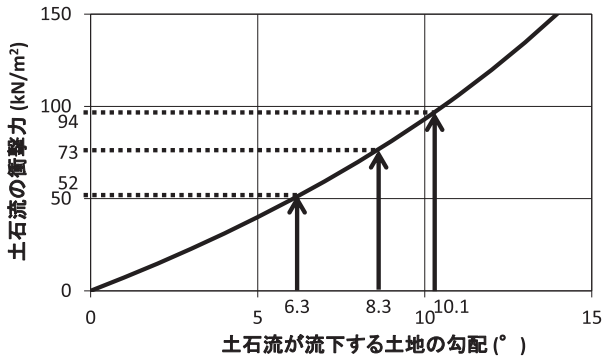


図-7 衝撃力の推定値と勾配の関係

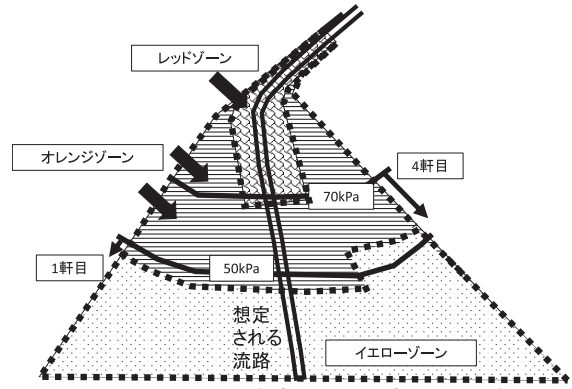


図-11 オレンジゾーンの設定イメージ

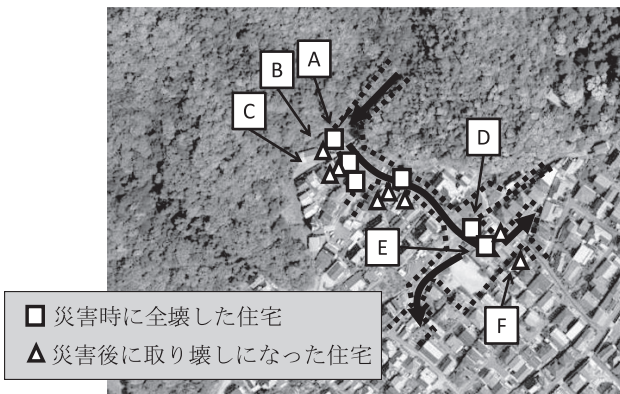


図-8 土石流の主な流路と被災した住宅 7)に加筆

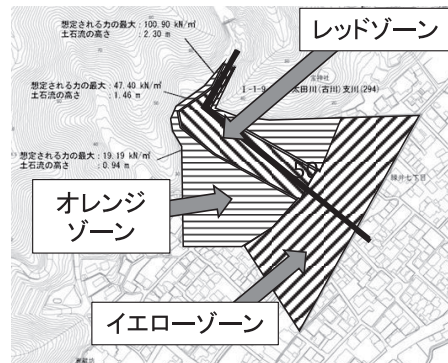


図-12 オレンジゾーンの設定提案例(緑井7丁目)6)に加筆

3.5 衝撃力で評価する新しい警戒区域の提案

上述の様に、70kPaの衝撃力が作用する地点の住宅の背後の2軒目まで、50kPaの衝撃力が作用する地点の住宅の背後までは危険である可能性が高いという結果を得た。1渓流だけの検討のため一般性は確認できていないが、試案として、この範囲を新しい警戒区域(オレンジゾーン)として指定することを提案する。すなわち、現状の警戒区域(イエローゾーン)より危険性が高く、豪雨時の避難行動として避難場所への避難が困難な場合においても住宅内にとどまることが不適切であると考えられる範囲である。

図-11にオレンジゾーン指定のイメージ図を示す。流路沿いの70kPaおよび50kPaの衝撃力が作用すると推定された地点と同じ勾配の場所を線で結ぶ。そして、その線のそれぞれについて、住宅の背後の2軒目まで、および、その住宅までをオレンジゾーンとして指定する。図-12は、緑井7丁目の渓流において、実際に検討されている特別警戒区域(レッドゾーン)および警戒区域(イエローゾーン)に、提案方法で求めたオレンジゾーンを書き加えたものである。なお、図-12の特別警戒区域(レッドゾーン)および警戒区域(イエローゾーン)は災害発生後に公表されたものであり、未指定である。

図-12における警戒区域の設定状況を見ると、想定される土石流の流路沿いの上流側はレッドゾーンとなる。提案

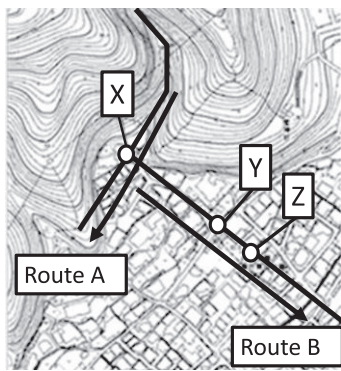


図-9 土石流の主な流路のまとめ 6)に加筆

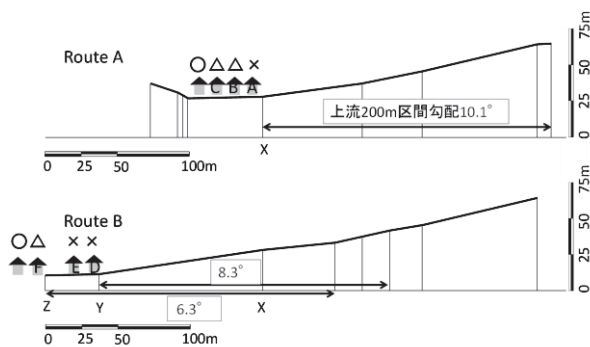


図-10 勾配の変化と被災状況

(×: 被災・全壊, △: 災害後に取り壊し, ○: 残存)

するオレンジゾーンはその周りとなり、土石流の想定流路は影響しない。イエローゾーンは下流まで分布するが、イエローゾーンの設定方法の見直しは本論では議論していないため、土石流の想定流路が影響するイエローゾーンよりも広い範囲でオレンジゾーンが指定された部分がある。

以上のように、勾配によって変化する土石流の衝撃力のみに着目した新たな警戒区域の設定は可能である。これは、土石流が2波・3波と生じた際に、最初の土石流で被害を受ける可能性の高い区域（レッドゾーン）ほど確率は高くはないものの、条件次第では（ただし、どういった条件でどのような事態が生じるかを事前に求めることは困難であり、住民にとっては、運が悪ければ、と解釈される場合に）同程度の被害を受ける可能性が高い区域を抽出できるということを意味する。しかし、どの程度の衝撃力の範囲までを指定するべきかは、多くの土石流の事例における衝撃力の推定値と被災・無被災の事例の比較から検討を行っていく必要がある。さらに、現行の土砂災害防止法では、指定された警戒区域に対しては、警戒避難体制の整備が行われ、特別警戒区域に対しては、それに加え、構造物の構造規制や移転勧告などが行われる。（特別）警戒区域の指定には、規制や対策が伴う。そのため、オレンジゾーンの指定を慎重に行うとともに、指定後の規制・対策の内容についても議論していく必要がある。

4. まとめ

本研究では、土石流の衝撃力に基づく警戒区域の指定法の可能性を検討した。まず、衝撃力の推定に必要な土石流流量の推定における課題を緑井7丁目の流出土砂量に基づく流速の算定を例に検討した。次に、住宅の破壊状況と推定した土石流の衝撃力の関係を調べ、衝撃力に基づく警戒区域の設定方法のイメージを示し、今後の検討課題を明らかにした。主要な知見を下記に記す。

- (1) 衝撃力は流速の2乗に比例すると考えられており、流速の推定精度が重要である。しかし、流速を決定づけるピーク流量の推定式の妥当性について、種々の土質条件・雨量条件に対して検討することが望ましいと思われる。
- (2) 平成26年広島豪雨災害では、想定以上の土砂流出が生じた。この原因は、想定以上の1.75倍に及ぶ浸食断面積であると思われる。したがって、衝撃力の算定根拠となる土砂流出量の推定において、各種の土質条件や降雨条件に応じた浸食断面積（浸食深および浸食幅）の評価方法の検討が必要である。
- (3) 勾配によって変化する土石流の衝撃力のみに着目し

た新たな警戒区域（オレンジゾーン）を提案し、試案によりオレンジゾーンの設定は可能であることを示した。これは、土石流が2波・3波と生じた際に、条件次第では同程度の被害を受ける可能性が高い区域を抽出できるということを意味する。

- (4) オレンジゾーンの実際の運用にあたっては、どの程度の衝撃力の範囲までを指定するべきかを、多くの土石流の事例における衝撃力の推定値と被災・無被災の事例の比較から検討を行っていく必要がある。
- (5) オレンジゾーンとして指定された区域に対して、どのような規制・対策の実施が適切かも議論していく必要がある。

謝辞

本検討は土木学会・地盤工学会・平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団での議論、地盤工学会中国支部・広島地域地盤工学セミナーでの議論において、数多くの示唆をいただいた。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) 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。
- 3) 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。
- 4) Uchida, T., Nishimoto, H., Osanai, N. and Shimizu, T. Countermeasures for Sedi-ment-related Disasters in Japan using Hazard Maps, *International Journal of Erosion Control Engineering*, Vol. 2, No. 2, pp.46-53. 2009.
- 5) 広島県土木局砂防課，広島県 基礎調査マニュアル（案）（土石流編），2009。
- 6) 広島県土木局砂防課，土砂災害警戒区域・特別警戒区域図，土砂災害ポータルひろしま。
<http://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/map/keikai.aspx>, (参照 2015-05)。
- 7) 国土地理院地図，<http://www.gsi.go.jp/>, (参照 2015-05)。
- 8) Kang,H. and Kim,Y. Study of physical vulnerability curves based on characteristics of damage to buildings by debris flow, *International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE2014)*, pp.188-189, Korea, 2014.

(2015年6月22日 受付)