

◆特集：災害の軽減をめざして◆

土石流による家屋被災範囲の推定手法

水野秀明* 寺田秀樹**

1. はじめに

土石流災害を防止・軽減するために対策を講じることが緊急の課題である。平成15年7月19日から21日にかけて、梅雨前線に伴う豪雨が九州地方を襲い、多数の土砂災害が発生した。写真-1は福岡県太宰府市三条一丁目で発生した土石流災害による家屋の被災の事例である。なお、災害の詳細はすでに報告¹⁾したので、そちらを参考にされたい。

土石流災害を防止・軽減するための対策としては、①砂防えん堤などの人工構造物によって土石流の発生を予防し、あるいは、発生した土石流の流れを制御して、土石流が住宅地など保全すべき地区に流れ込まないようにするハードによる対策と、②土石流の発生が予想される危険な範囲を示すとともに危険な場合に警戒し避難するソフトな対策の2種類がある。

さて、土石流災害を防止・軽減するための対策をとるべき箇所、すなわち土石流の発生の危険性があり、人家に被害を及ぼす恐れのある溪流(「土石流危険溪流」)は全国にどの程度存在するのだろうか。国土交通省が行った最近の調査²⁾によると、162,908箇所にもものぼる。このすべてに①のハードな対策を講じていくためには、膨大な時間と費用を必要とする。このような背景から、①のハードな対策を推進するとともに、②のソフトな対策をさらに充実させることによって、土石流災害を含む土砂災害の防止を図るために、土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律(以後、「土砂災害防止法」と呼ぶ)³⁾が平成13年4月1日に施行された。

本研究は土砂災害防止法に見られるように、土石流災害の発生が想定される危険な土地、すなわち土石流によって家屋が被災する土地の範囲(以後、「家屋被災範囲」と呼ぶ)を設定する方法に着目したものである。

家屋被災範囲の設定は土石流氾濫計算⁴⁾等を利用することも考えられるが、膨大な数の土石流危険溪流等に対して行うことになるため、短時間で設定できる簡便な方法が望まれる。そこで、本研究では土砂災害防止法に関する国土交通省告示⁵⁾

に示された手法を基にし、土石流の流下幅の設定に既往災害から求めた推定方法を加味した手法を過去の土石流災害に適用し、被災家屋包含率を検証するとともに、基準地点の位置や土石流により流出する土石等の量が家屋被災範囲に与える影響を分析することを目的とする。

2. 家屋被災範囲の設定手法

2.1 家屋被災範囲の定義

本研究では、家屋被災範囲は後述する方法で算出した流体力が建築物の耐力を上回る土地の区域とする。予め設定した土石流の流下経路の地点(以後、計算地点と呼ぶ)において、土石流の流体力と建築物の耐力を算出し、比較する。

2.2 設定手順

家屋被災範囲を設定する手順は大きく分けると5段階から構成される。第一段階では基準地点の設定、第二段階では基準地点における土石流のピーク流量の算出、第三段階では土石流の流下経路の設定、第四段階において流下経路上の地点での流体力と耐力の算出、第五段階において流体力と耐力の比較と家屋被災範囲の図示を行う。

2.3 流体力の算出方法

2.3.1 流体力の算出式

土石流の流体力($F_d[kN/m^2]$)は式(2)と式(3)を連立して解いた土石流の流速を、式(1)に代入して算出する。図-1はある計算地点における横断面である。土石流の流速は等流計算を行なって式(2)と式(3)が満たされるように算出する。但し、その際、流下断面の面積は地盤と土



写真-1 福岡県太宰府市三条一丁目被災状況

石流の表面で囲まれた領域の面積の値とするが、流下断面の形状は図-1の点線のように矩形で近似する。つまり、土石流の波高 (h) は土石流の流下断面 (A) をその表面の幅 (B) で除した値とする。

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

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

$$Q_{SP} = BUh \quad \dots (3)$$

$$\rho_d = \frac{\rho \tan \phi}{\tan \phi - \tan \theta} \quad \dots (4)$$

ここで、U：土石流の流速 [m/s]、n：粗度係数、h：土石流の波高 [m]、 θ ：土地の勾配 [度]、 Q_{SP} ：土石流のピーク流量 [m³/s]、B：土石流の流下幅 [m]、 ρ_d ：土石流の密度 [t/m³]、 ρ ：土石流に含まれる流水の密度 [t/m³]、 ϕ ：土石流に含まれる土石等の内部摩擦角 [°] である。なお、 θ は当該計算地点とその上流側に所定の水平距離だけ離れた、流下経路上の地点の2地点間で計測する。また、B は土石流の表面の幅とする (図-1)。

各計算地点における Q_{SP} は式 (5) により算出する。

$$Q_{SP} = \frac{0.01VC_d}{C_d} \quad \dots (5)$$

ここで、 C_s ：堆積土砂の容積濃度、 C_d ：土石流の土砂濃度、V：土石流により流下する土石等の量 (空隙込み) [m³] である。 C_d は式 (6) で算出する。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad \dots (6)$$

一般的に、基準地点は扇頂部に位置すると想定されるので、土石流の流下経路は土石流が堆積する区域であると考えられる。つまり、土砂の堆積を考慮して V を算出する必要がある。土石流は土砂濃度 C_d で流れることと、土砂は容積濃度 C_s で堆積すると仮定すると、 Q_{SP} は式 (7) のようになる。

$$C_{d0} \cdot Q_{SP0} = C_d \cdot Q_{SP} + C_s \cdot (Q_{SP0} - Q_{SP}) \quad \dots (7)$$

$$\therefore Q_{SP} = \frac{C_{d0} - C_s}{C_d - C_s} \cdot Q_{SP0}$$

ここで、 Q_{SP0} ：基準地点における Q_{SP} 、 C_{d0} ：基準地点における C_d である。基準地点における土石流により流下する土石等の量を V_0 とおくと、式 (5)、(7) から計算地点における V が式 (8) のように得られる。

$$V = \frac{C_s - C_{d0}}{C_s - C_d} \cdot \frac{C_d}{C_{d0}} \cdot V_0 \quad \dots (8)$$

また、計算の対象となる土石流の流下経路は堆積区間になると仮定すると、下流に行くにつれて Q_{SP} が大きくなるのは不自然である。そこで、下流に行くにつれて Q_{SP} が大きならないように式 (8) の計算時についてのみ、ある計算地点 a の土地の勾配 θ_a が当該地点の上流にある計算地点 b の土地の勾配 θ_b を上回る場合 ($\theta_a > \theta_b$) には、 $\theta_a = \theta_b$ とする。なお、式 (1) ~ (4) について、計算地点 a の θ は θ_a とする。

2.3.2 土石流の流下幅の推定方法

過去に発生した土石流災害を見ると、扇状地上での土石流の流下幅は横断方向には扇状地の全幅までは広がっていない。しかし、前述の方法で B を算出すると、扇状地等では B の値が扇状地の全幅と同じになる場合や設定できない場合が考えられる。そこで、B については上限値 (B_{max}) を設定する。

図-2 は過去に発生した土石流災害に関する記録から推定した土石流のピーク流量と流下幅の関係をプロットしたものである。レジーム型の式を

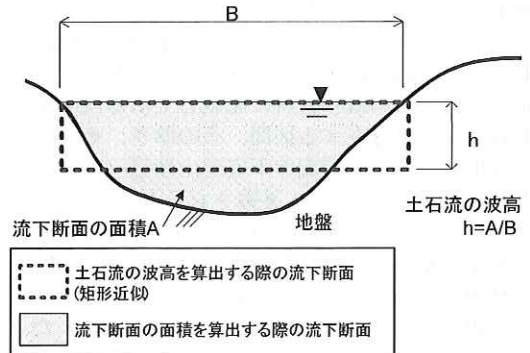


図-1 土石流の流下断面 (想定)

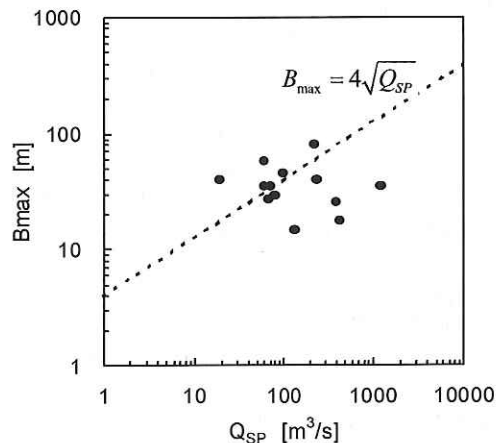


図-2 土石流の流下幅

適用できると仮定すると、土石流の流下幅は平均的に式 (9) で表される。この式 (9) を $B_{\max}$ とし、等流計算の際、 B の値が $B_{\max}$ を超えた場合、 $B = B_{\max}$ とする。

$$B_{\max} = 4\sqrt{Q_{sp}} \quad \dots (9)$$

2.4 建築物の耐力の算出方法

建築物の耐力 (P [kN/m²]) は式 (10) ³⁾ から算出する。

$$P = \frac{35.3}{h(5.6-h)} \quad \dots (10)$$

本研究では、 F_d が P を上回った地点で、土石流の流下幅の範囲内を家屋被災範囲とする。なお、本報告で記載していない事項は文献 ^{3) 5)} を参考にしたい。

3. 過去の土石流災害への適用

3.1 適用した災害事例の概要と適用条件

表-1 に今回適用した災害の 16 事例の流域面積、災害年月日、災害時の流出土砂量等の災害諸元と、解析に用いた地形図の縮尺を示す。表-2 は今回適用した災害の発生した地区における、 V_0 の値の算出結果である。本研究では、基準地点を地形図上の谷の出口に設定した。 V_0 の値は土石流危険渓流カルテなどの既存資料に記載してある溪床堆積土砂の有無、存在する区間、その厚さ、その幅から算出した、最長渓流の不安定土砂量（移動可能土砂量）と降雨により運搬される最大の土砂量（運搬可能土砂量）を比較して、小さい値とした。その他のパラメータは一般的な数値として $n=0.10$ 、 $C_s=0.6$ 、 $\sigma=25.51\text{kN/m}^3$ 、 $\rho=11.77\text{kN/m}^3$ 、 $\phi=30^\circ$ 、 $\lambda=0.4$ ⁶⁾ とし、全ての事例で用いた。

土石流の流下経路は本来なら流路の流過能力などから氾濫し始める地点を想定して設定すべきと考えられるが、収集した資料では土石流災害当時の流路の流過能力を推定できなかったため、すべてのケースで流路沿いと想定した。

計算ケースは 3 種類設定した。適用ケース①では、土石流災害の経験のない溪流において被災家屋範囲を設定することを想定して、土石流災害に関する情報（実績値）を一切使わないで設定した場合の精度を評価する。適用ケース①の基準地点は地形図上の谷の出口とし、 V_0 の値は表-2 の値を用いる。適用ケース②では、 V_0 が精度に与える影響を評価するために、 V_0 の値を表-1 と土石流災害時の流出土砂量（実績値）を比べて大きい値とする。適用ケース②の基準地点は適用ケース①と同じとする。適用ケース③では、基準地点の位置が精度に与える影響を評価するために、基準地点を実際の土石流氾濫開始点に設定する。適用ケース③の V_0 の値は適用ケース①と同じとする。

表-1 適用した災害の諸元

溪流名	流域面積 (km ²)	災害年月日	災害実績図面縮尺	災害時における流出土砂量 (m ³)	建築物の戸数					
					全壊			半壊		
					内訳		人家以外	内訳		人家以外
					人家	人家以外		人家	人家以外	
A 溪流	0.90	H11.08.15	1/2500	5592	1	1	0	1	1	0
B 溪流	0.64	H10.08.30	1/2500	15000	0	0	0	2	2	0
C 溪流	0.09	H01.09.20	1/2500	1480	5	0	5	2	1	1
D 溪流	0.29	H10.09.25	1/5000	4080	1	1	0	1	1	0
E 溪流	0.20	H10.10.18	1/1000	2000	1	1	0	1	1	0
F 溪流	0.11	H03.07.05	(1/5000)	25000	1	1	0	0	0	0
G 溪流	0.07	H02.07.02	1/2500	4700	1	0	1	2	2	0
H 溪流	0.07	H05.08.06	1/2500	18500	5	3	2	0	0	0
I 溪流	0.04	H05.08.06	1/2500	20000	1	1	0	0	0	0
J 溪流	0.20	H07.08.10	(1/2500)	2000	0	0	0	3	3	0
K 溪流	0.06	H11.09.22	(1/2500)	3748	1	1	0	2	2	0
L 溪流	1.09	H09.07.12	1/10000	96000	2	1	1	1	0	1
M 溪流	0.39	H08.08.28	(1/4000)	2300	0	0	0	1	1	0
N 溪流	0.10	H09.09.16	1/5000	1450	0	0	0	2	2	0
O 溪流	0.09	H09.09.16	(1/2500)	1410	0	0	0	3	3	0
P 溪流	0.04	H09.09.16	(1/2500)	3300	0	0	0	1	1	0
					19	10	9	22	20	2

なお、適用ケース①、②、③において、 θ を計測する際の 2 地点間の水平距離の違いが計算結果に与える影響を評価するために、3 種類 (10m、100m、200m) の計測距離を設定した。

3.2 適用結果

3.2.1 評価方法

適用結果の評価に際して、「被災家屋包含率」と「無被災家屋率」の 2 つの新しい指標を定義する。

被災家屋包含率は、実際の被災家屋（全数）のうち今回設定した家屋被災範囲に包含された被災家屋の戸数の割合とする。被災家屋は土石流等により被災した建築物のうち、全壊あるいは半壊の状態になった家屋（人家）とする。また、無被災家屋率は家屋被災範囲に包含された無被災家屋の戸数を、家屋被災範囲に包含された人家の戸数（被災家屋と無被災家屋の合計）で除した値とする。無被災家屋は実際には被災しなかった家屋（人家）とする。被災家屋包含率が高く、無被災家屋率が低くなるほど、精度の高い手法と判断する。

3.2.2 既存資料だけで設定した場合（適用ケース①）

図-3、4、5 は O（オー）溪流への適用例で、 θ を計測する 2 地点間の距離を 10m、100m、200m とした場合である。実際の被災家屋は 3 戸あり、そのうち家屋被災範囲の中に入った被災家屋は 1

表-2 V_0 の値の算出結果

渓流名	渓床堆積土砂量[m ³]	流域面積A[km ²]	流出補正率fr	24時間雨量R _T [mm/24h]	土地の勾配[°]	選搬可能土砂量Vec[m ³]	基準地点における土石流により流下する土石等の量V ₀ [m ³]
A 渓流	26,460	0.90	0.2745	250.0	8	33,107	26,460
B 渓流	13,910	0.64	0.3108	340.8	6	21,643	10,992
C 渓流	1,536	0.09	0.5000	310.0	12	20,620	1,536
D 渓流	7,700	0.29	0.3720	250.0	6	19,263	7,700
E 渓流	4,750	0.20	0.4408	292.8	10	20,819	2,950
F 渓流	9,000	0.11	0.4665	399.0	6	9,506	9,000
G 渓流	7,000	0.07	0.5000	351.0	6	4,827	4,827
H 渓流	2,300	0.07	0.5000	305.7	17	20,934	2,300
I 渓流	1,215	0.04	0.5000	305.7	20	11,962	1,215
J 渓流	6,150	0.20	0.4142	305.3	8	16,052	6,150
K 渓流	3,500	0.06	0.5000	280.0	17	10,957	3,500
L 渓流	61,560	1.09	0.2450	247.5	6	25,251	25,251
M 渓流	6,634	0.39	0.3254	328.0	6	34,303	6,634
N 渓流	3,700	0.10	0.4408	209.0	10	14,900	3,700
O 渓流	6,000	0.09	0.5000	292.8	7	6,616	6,000
P 渓流	9,600	0.04	0.5000	292.8	10	5,903	5,903

戸 (10m の場合)、3 戸 (100m の場合)、3 戸 (200m の場合) であったので、被災家屋包含率は 33.3% (10m の場合)、100.0% (100m の場合及び 200m の場合) となった。また、無被災家屋は 2 戸 (10m の場合)、1 戸 (100m の場合及び 200m の場合) であったので、無被災家屋率は 66.7% (10m の場合)、25.0% (100m の場合及び 200m の場合) となった。この事例では、被災家屋包含率は 3 つのケースのうち 100m と 200m の場合が高く、無被災家屋率は 3 つのケースのうち 100m と 200m の場合が低いことになる。

表-3 は 16 事例の被災家屋と無被災家屋を合計し、被災家屋包含率と無被災家屋率を算出した結果である。適用ケース①についてみると、被災家屋包含率は高い順に 70.0% (200m の場合)、66.7% (100m の場合)、56.7% (10m の場合) の順になった。無被災家屋率は低い順に 78.0% (100m の場合)、79.6% (200m の場合)、87.4% (10m の場合) となった。以上のように、 θ を計測する 2 地点間の水平距離を 100 ~ 200m 程度にすれば、無被災家屋率は 80% 程度となるものの、被災家屋包含率は 70% 程度と高くなることが分かった。また、 θ を計測する 2 地点間の水平距離を 200m 程度とすれば、家屋被災範囲は分断されず一連の土地の区域となることが分かった。

3.2.3 既存資料と災害実績から V_0 を設定した場合 (適用ケース②)

適用ケース②で対象となった事例は 16 事例中 6 事例 (B 渓流、F 渓流、H 渓流、I 渓流、K 渓流、L 渓流) である。

図-6 は H 渓流への適用例で、 θ を計測する 2 地点間の距離を 200m とした場合である。図-7 は適用ケース①での H 渓流で 200m の場合である。適用ケース①と②を比較すると、適用ケース②の被災家屋包含率は 33.3% から 100.0% に高くなり、無被災家屋率は 75.0% から 67.0% に低くなった。H 渓流では、精度は向上したことになる。これは、適用ケース②での V_0 (18,500m³) が適用ケース①での値 (2,300m³) より大きくなったことにより、家屋被災範囲が広がり、被災家屋包含率が向上したためである。

表-3 の適用ケース②を見ると、被災家屋包含率は高い順に 80.0% (100m の場合)、76.7% (200m の場合)、60.0% (10m の場合) となった。

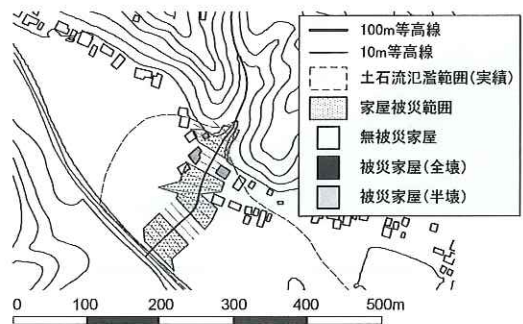


図-3 O 渓流 (適用ケース①: 10m の場合)

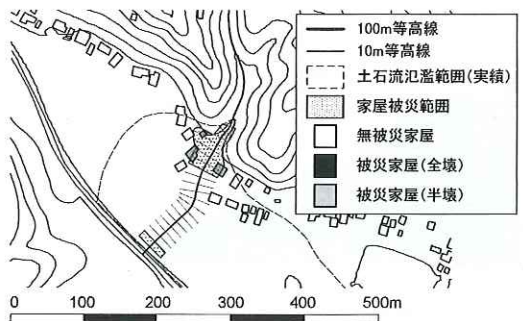


図-4 O 渓流 (適用ケース①: 100m の場合)

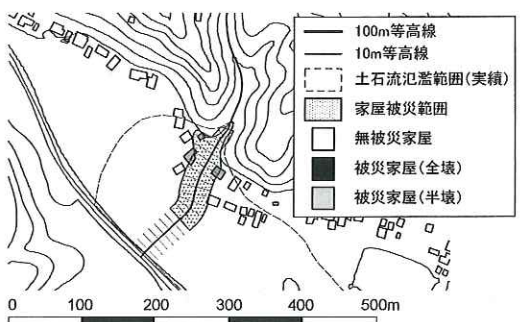


図-5 O 渓流 (適用ケース①: 200m の場合)

表-3 被災家屋包含率と無被災家屋率

			適用ケース①	適用ケース②	適用ケース③
θ を計測する2地点間の距離	10 m	被災家屋包含率	56.7%	60.0%	46.7%
		無被災家屋率	87.4%	87.1%	89.1%
	100 m	被災家屋包含率	66.7%	80.0%	73.3%
		無被災家屋率	78.0%	78.6%	74.7%
	200 m	被災家屋包含率	70.0%	76.7%	76.7%
		無被災家屋率	79.6%	80.2%	77.2%

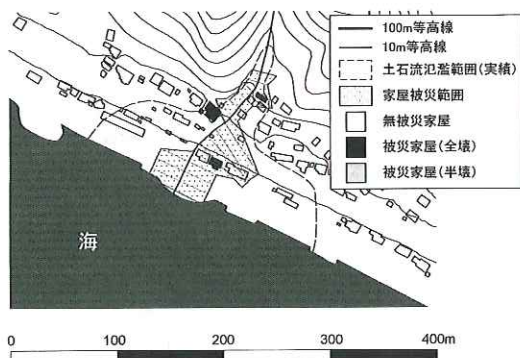


図-6 H 溪流 (適用ケース②: 200m の場合)

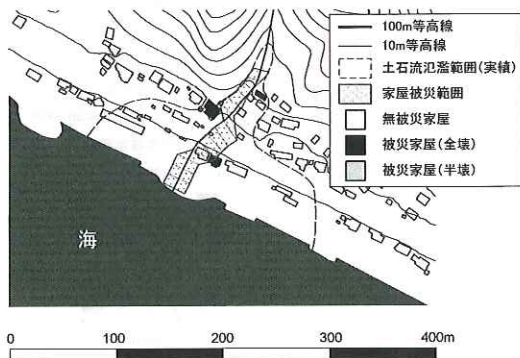


図-7 H 溪流 (適用ケース①: 200m の場合)

無被災家屋率は低い順に 78.6% (100m の場合)、80.2% (200m の場合)、87.1% (10m の場合) となった。

適用ケース①と比べると、 V_0 は表-2と土石流災害での流出土砂量の値を比較して大きい方を用いた場合、家屋被災範囲が広がるため被災家屋包含率が高くなるものの、無被災家屋率も高くなるという傾向があることが分かった。また、 θ を計測する2地点間の水平距離を長くすると、被災家屋包含率が向上しやすいという傾向が見られた。

3.2.4 災害実績から基準地点の位置を設定した場合 (適用ケース③)

土石流災害時の実際の氾濫開始点が適用ケース①の基準地点より下流に位置した事例は B 溪流、D 溪流、M 溪流の 3 溪流で、その他の 13 溪流は上流に位置した。

基準地点の位置が適用ケース①と比べて下流に位置した事例として、図-8に D 溪流について適用結果 (200m の場合) を示す。家屋被災範囲内に被災家屋が 2 戸含まれたので、被災家屋包含率は 100.0% となった。また、無被災家屋が 8 戸含まれたので、無被災家屋率は 80.0% となった。図-9は適用ケース①での D 溪流での適用結果 (200m の場合) である。被災家屋包含率と無被災家屋率はそれぞれ 0.0% と 100.0% であった。このように、基準地点を下流にした場合、D 溪流では被災家屋包含率が高くなり、無被災家屋率が低くなった。この理由には次のような 2 点が考えられる。一つは基準地点が適用ケース①と比べて被災家屋の近くになったことである。もう一つは、

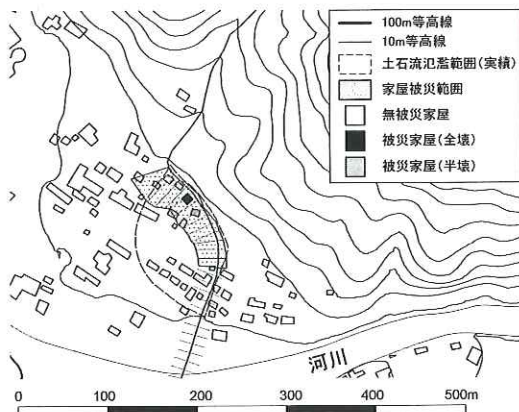


図-8 D 溪流 (適用ケース③: 200m の場合)

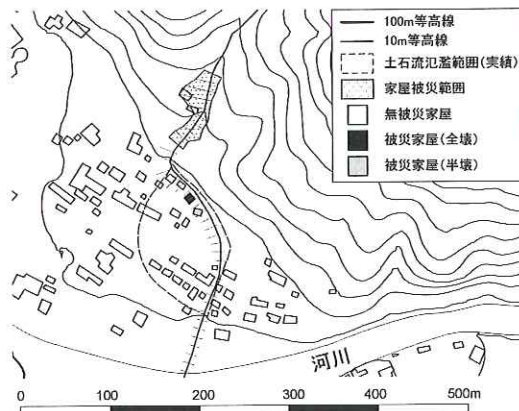


図-9 D 溪流 (適用ケース①: 200m の場合)

θ_0 の値が 4° 程度小さくなったため、土石流ピーク流量(式(6))と流体力(式(1))が大きくなり、家屋被災範囲が広がったためと考えられる。

以上をまとめると、基準地点を実際の土石流氾濫開始点とした場合で、実際の土石流氾濫開始点が地形図上の谷の出口より下流にある場合には、被災家屋包含率が高くなり、無被災家屋率が低くなる事例があった。一方、谷の出口より上流にある場合には、被災家屋包含率、無被災家屋率ともに低くなった事例が多かった。

表-3の適用ケース③をみると、被災家屋包含率(全半壊)は高い順に76.7%(200mの場合)、73.3%(100mの場合)、46.7%(10mの場合)となった。無被災家屋率は低い順に74.7%(100mの場合)、77.2%(200mの場合)、89.1%(10mの場合)となった。

適用ケース①と比べると、実際の土石流災害時の氾濫開始点が谷の出口より下流であった場合に、基準地点を土石流災害時の氾濫開始点とした場合、100mと200mでは被災家屋包含率が高く、無被災家屋率が低くなったので、精度は適用ケース①に比べて若干向上した。この場合、家屋被災範囲に含まれた被災家屋の戸数は多くなり、無被災家屋の戸数は少なくなった。10mの場合では、被災家屋包含率が低く、無被災家屋率は高くなったので、精度は向上しなかった。

4. おわりに

土地の勾配を計測する2地点間の水平距離を200m程度とすると、土石流災害の実績に関する資料を用いなくても、2.で示した方法で設定した家屋被災範囲は過去の被災家屋の約7割以上を包含したことがわかった。

また、基準地点における土石流により流下する土石等の量の値として一溪流での流出土砂量の最大値と土石流災害での実際の流出土砂量の値を比較して大きい値を用いた場合には、被災家屋包含率は高くなるが、無被災家屋率も高くなることも分かった。このことから、過去の土石流災害時の流出土砂量が本研究⁵⁾で用いた手法により算出した値より大きい場合には、過去の土石流災害時の流出土砂量の値を V_0 として用いることで、被災家屋包含率の精度を向上させることが可能である。

さらに、基準地点を実際の土石流の氾濫開始点とした場合の被災家屋包含率と無被災家屋率の変化を検討したところ、基準地点が地形図上の谷の出口より下流側に位置した場合には、被災家屋包含率が高くなり、無被災家屋率が低くなる傾向が見られた。逆に、上流側に位置した場合、被災家

屋包含率は低くなり、無被災家屋率も低くなる傾向が見られた。このことから、過去の土石流災害時の氾濫開始点が地形図上の谷の出口より下流側に位置する場合には、その点を基準地点として用いることで、被災家屋包含率の精度を向上させることが可能である。

今後は、本報告で示したように、無被災家屋率が7割から8割程度と高いことから、無被災家屋率を低減させる手法を検討していきたい。最後になりますが、過去の土石流災害に関する資料等の既存資料を快く提供していただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寺田秀樹、水野秀明、内田太郎、曾我部匡敏、原楨利幸、小山内信智、桜井 亘、武澤永純、土井康弘：平成15年7月18日から20日にかけて福岡県太宰府市と熊本県水俣市で発生した梅雨前線豪雨による土砂災害(速報)、土木技術資料 Vol.45, No.9, pp.4-7, 平成15年9月
- 2) 国土交通省砂防部：土石流危険渓流及び急傾斜地崩壊危険箇所に関する調査結果の公表について、砂防と治水, Vol.36, No.1, pp.28-32, 平成15年4月
- 3) 国土交通省：国土交通省告示第332号, 平成13年3月
- 4) 例えば、高濱淳一郎：土石流による河床変動、山地河川における河床変動の数値計算、(社)砂防学会編, pp.118-133, 平成12年9月
- 5) 寺田秀樹、水野秀明：土石流による家屋被災範囲の設定方法に関する研究、国土技術政策総合研究所資料70号, 146p., 平成15年3月
- 6) 建設省河川局砂防部砂防課：土石流対策技術指針(案)第I編計画編, pp.3-5, 平成12年10月

水野秀明*



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
主任研究官、農博
Dr. Hideaki MIZUNO

寺田秀樹**



国土交通省国土技術政策
総合研究所危機管理技術
研究センター砂防研究室
室長
Hideki TERADA