

土石流による木造家屋の破壊限界評価

北海道大学農学研究院(前三重大学生物資源学研究科) 山田 孝

はじめに

砂防施設の整備が進まない土砂災害危険区域では、まずは想定被害情報の高度化が必要となる。従来からの公助によるソフト対策の強化に加え、自宅などでの垂直避難による安全性や財産の損失につながる住宅の被害程度の予測といった個別の家屋診断技術、土砂災害に対する安全を確保し被害損失を最小化できるセミハードの家屋構造改良技術などが今後は重要になると考えられる。

近年の土砂災害被災地における家屋被災度データ(三重大学森林環境砂防学研究室調査)と土石流の横断方向流速分布を考慮した流体力の計算値をもとに、土石流流体力と木造家屋被災度との関係を整理し、土石流氾濫・堆積区域における木造家屋の破壊限界(特に家屋水平移動・流失限界)について考察した。

研究方法

家屋被災データは、次の 83 軒の調査結果を用いた。

2011 年：三重県南牟婁郡紀宝町高岡地区「蛇崩川」、浅里和田地区「大和田川」木造家屋 7 軒、2012 年：熊本県阿蘇市一の宮町手野地区東手野、三野地区塩井、坂梨地区福岡、熊本県阿蘇郡南阿蘇村立野地区新所木造家屋 32 軒、2014 年：広島県広島市安佐南区八木 3,4 丁目、緑井 8 丁目、木造家屋 41 軒、鉄筋コンクリート 1 軒、2016 年：岩手県岩泉町浅内地区、木造家屋 2 件

現地調査項目は、土石流氾濫堆積範囲、地盤勾配、家屋の位置、家屋の被災度、土石流の流動深などである。ここで、家屋の被災度の区分は、「流失」、「水平移動」、「全壊」、「半壊」、「損壊」、「軽微な土砂堆積」とした。「流失」は、家屋の基礎しか残っていない状態、「水平移動」は、柱や壁の損傷は少ないが、家屋が基礎から離れて移動した状態、「全壊」は、家屋の柱の一部が破壊され、壁も破壊されている状態、「半壊」は、家屋の壁の一部が破壊されている状態、「損壊」は、家屋の開口部(窓やドア)の一部が破壊されている状態、「軽微な土砂堆積」は、家屋の内部への土砂流入はみられないが、家屋周辺に土砂が堆積している状態を示す。土石流の後続流の範囲には、耐力壁が大きく破壊されるなどの被害はない(開口部の破壊はある)と判断し、本研究では、前述の全ての被災形態が認められた土石流本体部の範囲のみを対象とした。土石流流体力の算出に必要な土石流流動深は、家屋の壁面や塀等での流下痕跡を計測した値を基本とし、家屋の地盤高を考慮した値を適用した(土石流が家屋に衝突した直後の堰上げ高は考慮しない)。土石流の流速(土石流の流下中心線上の速度)は、マニングの抵抗則を準用し、粗度係数は、発災前の氾濫・堆積区域での土地被覆状態などを参考に、0.03~0.06 とした。ただし、今回対象とした上記の土砂災害対象地では、映像資料等の解析に基づく実際の土石流の流速データは得られていないため、マニング式によって求めた流速の妥当性は議論できない。また、土石流本体部の流れが対象であるため、市街地での河川の洪水氾濫流計算¹⁾のように、家屋群の占有面積率に応じて粗度係数を調整することは行っていない。土石流の流れにおいては、中心線から横断方向に遠くなると流速も遅くなることを踏まえ、水理模型実験により土石流の横断方向の流速分布を調べた。実験で利用した水路は、流路幅 9.7 cm、流路長 250 cm、流路高 9.2 cm である。水路床には実験に用いる土砂(粒径：1~2mm)と同じ粒径の砂をボンドで接着した粗度板を設置した。実験は 4 ケースで、移動床と固定床のそれぞれで勾配が 10° と 15° の場合で行った。移動床の実験では流路全体に 2cm の土砂を敷き詰めて上から水を流し、固定床では 2cm の厚さで上流側から 92cm 下の地点まで土砂を敷き詰めて上流から水を与えた。土石流の横断方向の流速分布を明らかにするために、流路の真上からビデオカメラ(CASIO EXILIM EX-100)のハイスピード動画撮影モード(240 コマ/秒)で撮影した。また、土石流の流動深を計測するために、側面からビデオカメラで撮影した。真上からハイスピードカメラで撮影した映像を PIV 解析ソフトウェア(Flow-PIV ver.6.01 ライブラリー株式会社)を用いて解析した。次いで、既往研究^{2)~4)}を基にその近似式を算出することによって、土石流の横断方向の流速分布式を作成した。そして、この式を用いて、マニングの式で求めた 83 軒の家屋近傍での流速を補正し、横断方向の流速を求めた。土石流の流体力は、高橋の平衡土砂濃度式を用いて土砂濃度を求めて土石流の流れの密度を計算し、これに流速(土石流の横断方向の流速分布式によって補正した値)の二乗値と土石流流動深を乗じて算出した。得られた流体力の値を用いて、土石流氾濫・堆積区域における木造家屋の被害度と破壊限界を考察した。

結果と考察

水理模型実験で発生させた土石流の基本的な流れの諸元は、流速：35~54cm/s、土砂濃度：0.3~0.5、流量：230~680cm³/s である。また、相対水深は 7~13、流速係数は 3~4 である。

土石流のフロント部の流下映像を PIV 解析した結果の事例を図-1 に示す。今回の解析では流れの先端部近

くで、流れが安定していると考えられる地点を決め、写真中に白線で示した。白線部において各ベクトルの流速を判読して、横軸を土石流の中心からの距離、縦軸を流速とするグラフを作成し、流速分布を検討し、以下の(1)式によって近似した。

$$\frac{U}{U_{max}} = (1 - \frac{b}{B})^{\frac{1}{n'}} \cdots (1)$$

ここに、U：流速(cm/s)，Umax：最大流速(cm/s)(土石流の流下中心線上の流速)，b：土石流の流下中心線から被災家屋までの横断方向の水平距離，B：土石流の流下中心線から横断方向の土石流堆積縁までの水平距離，n'は定数

(1)式を用いて、流体力(F(kN/m))を以下の(3)式によって求めた。

$$F = \left[\rho_s \left(\frac{\rho_w \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \theta - \tan \theta_0)} \right) + \left\{ 1 - \left(\frac{\rho_w \tan \theta}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \theta - \tan \theta_0)} \right) \right\} \rho_w \right] \left(\frac{1}{n'} H^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \right)^2 \left(1 - \frac{b}{B} \right)^{\frac{2}{n'}} H \cdots (2)$$

(2)式を用いて、家屋の被災度別に流体力を算出した結果を図-2に示す。筆者らの研究から、2014年8月20日の広島土石流災害の事例では、流出した木造家屋の住民、全壊の家屋の1階に居た住民は全員、死亡している。それ以外の区域の木造家屋や全壊家屋の2階に居た住民は、助かっていることが住民からのヒアリングやアンケートの結果⁵⁶⁾から明らかにされている。図-2の結果のみからは、垂直避難の効果を期待できない場合のある「水平移動」の流体力下限値は約100kN/m、垂直避難の效果がない「流失」区域は約150kN/mであることがわかる。一方、実際の本造家屋(築年数5年の枠組壁工法住宅)の引き倒し実験の事例において、実験で得られた荷重-変形曲線では、1階層間変形角が1/33の時に建物の最大耐力895kNが発現し、1/2.1の時に保有耐力0kN(倒壊)に至ったこと、この実験の最大耐力は、軸組構法住宅の場合と同程度であるとの報告がなされている⁷⁾。その実験に使用された家屋の引き倒し方向と直角方向の張間面の長さは約11mであることから、単純に前述の倒壊限界値を単位幅あたりに変換すると、約80kN/mとなる。この値は、前述の土石流流体力の家屋水平移動限界値に近いが流失限界値の半分程度の値である。また、壁倍率(3.0を採用)から耐力壁の最大水平耐力(壁力壁の最大耐力から耐力が20%低下したところまでをエネルギー的に等価な完全弾塑性モデルに置換した全塑性耐力)を足し合わせた保有水平耐力⁸⁾⁹⁾を計算すると、流れ方向(桁行方向とした)の壁長の総計が11m、20m、40mの場合、各々、約110kN、170kN、310kNとなる。現時点では、図-2に示す「流失」、「水平移動」の被災度における流体力の値が破壊限界に近いのかあるいは破壊限界値はそれらよりも低い値なのかは判断できないので、あくまでも現時点での経験値である。今後とも、家屋に作用した土石流の水理諸元のデータを蓄積するとともに、被災家屋の詳細な破壊形態(耐力壁、柱や接合部の損傷等、被災前の壁の分布と仕様等)を調べ、土砂水理、建築構造の両面から家屋の破壊限界評価を行う必要がある。

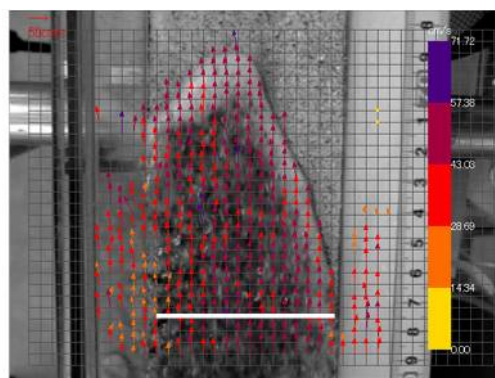


図-1 PIV解析による土石流フロント部の流速ベクトル

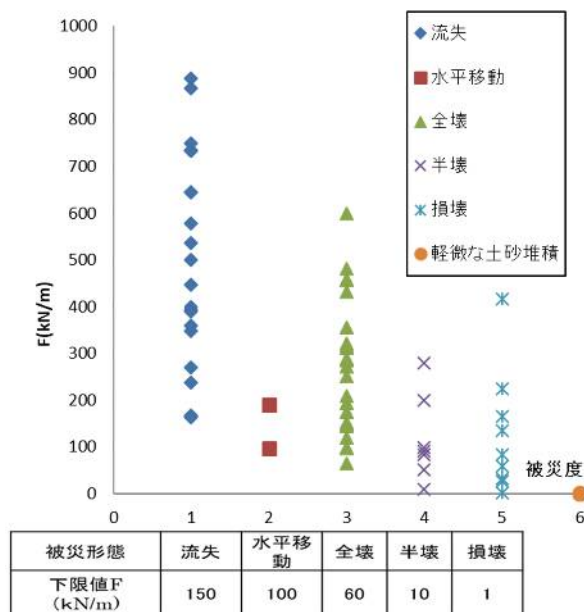


図-2 家屋被災度別の流体力(F)

参考文献

- 1)福岡捷二・川島幹雄・松永宜夫・前内永敏(1994)：密集市街地の氾濫に関する研究，土木学会論文集 No.491/Ⅱ-27，pp.51-60
- 2)新井宗之・劉雪蘭・高橋保(1999)：粘土土石流の表面流速解析とその流動機構の一考察，土木学会年次学術講演会講演概要集，Ⅱ，p.420-421
- 3)井筒勝彦・草薙義一(1986)：土石流の流動特性について I 先端部の流速分布，香川大学農学部学術報告，第38巻 第1号 pp.19-24
- 4)諏訪浩・奥西一夫(1990)：土石流の流動特性・材料特性と規模 - 焼岳上々堀沢の土石流 -，京都大学防災研究所年報 第33号 B-1，p.190-203
- 5)鈴木優貴・岡本あゆみ・山田孝(2016)：土石流に対する垂直避難行動の実態と垂直避難有効区域，平成28年度砂防学会発表概要集，p.354-355
- 6)大山久美・山田孝・菊谷幸加(2015)：土石流に対する垂直避難行動の実態と課題，平成27年度砂防学会研究発表会概要集，B-404～405
- 7)沖浦博(2011)：枠組壁工法住宅の耐震性能に関する諸検証，(財)建材試験センター，建材試験情報 12，
- 8)日本ツーバイフォー建築協会(1998)：枠組壁工法建築物構造計算指針，9)日本建築学会(2008)：木質構造の設計・学びやすい構造設計・