

2014年8月20日広島市安佐南区八木 地区で発生した土石流災害について

福岡 尚樹*・橋本 晴行**・高岡 広樹***

An Investigation into the Debris Flow Disaster in Hiroshima City, Japan on August 20, 2014

Naoki FUKUOKA*, Haruyuki HASHIMOTO** and Hiroki TAKAOKA***

Abstract

On August 20, 2014, a record heavy rain attacked the northern part of Hiroshima City. This heavy rain caused many debris flows in Asakita-ku and Asaminami-ku of Hiroshima city. This disaster killed 74 people. It is the worst debris flow disaster for several decades in Japan. The purpose of this study is to examine the characteristics of the debris flow. The Ueyama River in Asaminami-ku was selected as the study area. First, we surveyed and collected the material of the debris flow disaster. Second, we simulated the debris flow in the Ueyama River by the numerical calculation of the basic equations of debris flow. Five basic equations were used in this simulation; they are the momentum equation, the continuity equations of liquid phase and solid phase, and the equations of erosion rate of river bed and side. There are five unknown quantities, such as flow discharge, flow depth, sediment concentration, riverbed elevation, and river width. The initial inflow condition at the upstream end of the river was given as sediment volume of 4,000m³ by the slope failure. The results obtained in this study are as follows: (1) Total outflow of sediments and woody debris was about 30,000m³ and 620m³, respectively. (2) The debris flow reached the outlet of the valley in 90 seconds after the slope failure. (3) At the outlet of valley, the peak discharge was 950m³/sec, the flow depth was 5m and flow width was 21m.

キーワード：2014年広島土砂災害, 集中豪雨, 広島, 土石流, 土砂災害, 流木

Key words : heavy rain, debris flow, Hiroshima, sediment-related disasters, woody debris

* 九州大学大学院工学府
Graduate School of Engineering, Kyushu University

** 九州大学大学院工学研究院
Faculty of Engineering, Kyushu University

*** 国立研究開発法人土木研究所自然共生研究センター
Aqua Restoration Research Center, Public Works
Research Institute

2.2 土石流流下河道の状況

著者らは、2015年3月11～12日に、土石流の発生した溪流の断面および側岸上の植生の調査を行った。調査対象溪流は安佐南区八木3丁目の上山川である。調査を行った溪流の平面図と縦断面図を図3に示す。両図は国土地理院の地形図より作成した。

図3の平面図から、崩壊源頭部 O_m 地点、 O_t 地点でそれぞれ発生した土石流はC地点で合流して県営緑ヶ丘住宅へ流下したことが分かる。土木学会・土木学会中国支部・地盤工学会による調査²⁾

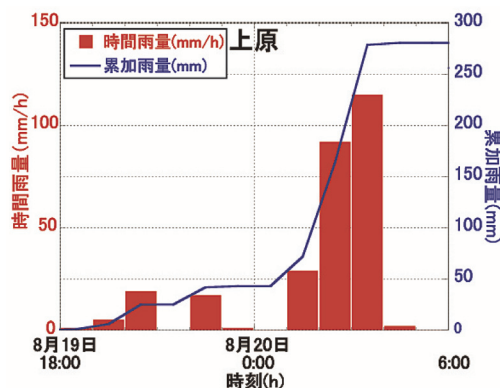


図2 上原観測点における時間雨量と累加雨量

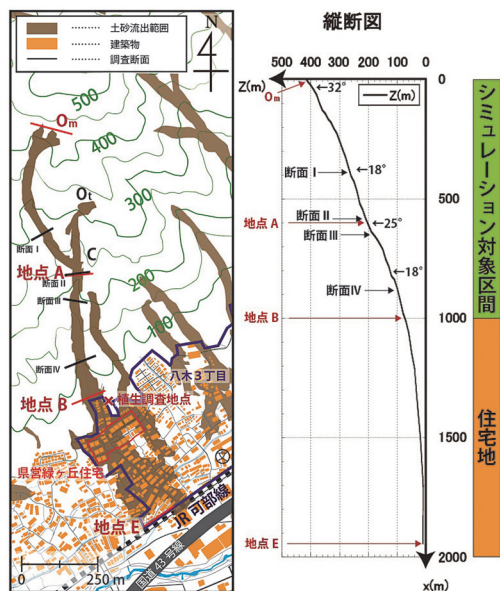


図3 土石流の平面図および調査箇所

では、少なくとも3回の土石流が流下した堆積痕が確認されている。図3の縦断面図は崩壊源頭部 O_m 地点から下流の住宅地までの範囲を作成した。地形図より読み取った河道勾配は源頭部付近で約30°、断面I付近では約18°、地点A付近で約25°、断面IV付近では約18°と極めて急勾配であった。

現地の河床は写真1に示すように、多くの箇所では岩盤の露出が確認された。また滝のように高低差の大きい段差が3箇所ほど存在していた。全体的に侵食傾向にあったが、断面IV付近など下流部では巨礫の堆積が見られた。

現地調査を行った溪流各断面の概形を図4に示す。断面Iは標高260m (x=390m) 付近に位置しており、階段状の段差が存在し、段差全体の落差は約3mだった。断面IIは標高210m (x=580m) 付近に位置しており、勾配は約10.4°であった。断



写真1 断面IIIの全体像(下流より上流を望む)

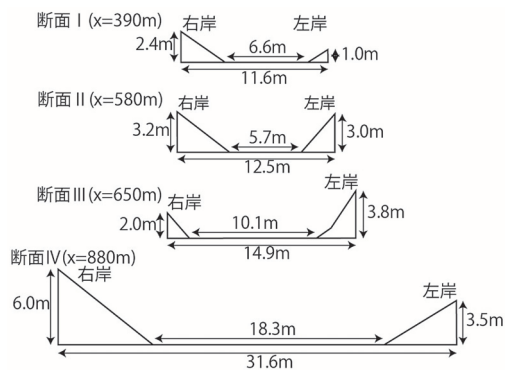


図4 調査を行った断面の概形

面Ⅲは標高180m (x=650m) 付近に位置しており、勾配は約16.4°であった。断面Ⅳは標高100m (x=880m) 付近に位置し、強靱ワイヤーネット工の施工部分である。河道部には巨礫のほか、直径0.4～0.1m程度まで大小さまざまな礫が存在していた。河床勾配は約11.3°であった。また、これより下流の住宅地の道路勾配は約8.2°であった。

さらに、流下した流木量の評価のため、渓流下流部の左岸上において植生の調査を実施した。今回は直径5cm以上の樹木を対象に、10m四方内の樹木本数および直径と樹高を計測した。調査範囲内には39本の樹木が存在した。また、根元からの分岐を有する樹木が多く、分岐した本数を含めると70本の樹木が存在し、その平均直径は8.6cm、長さは約6.4mだった。

2.3 住宅地における土石流被害の概要

今回の猛烈な雨に伴い、大量の雨水排水が下水や側溝から溢れ、急勾配の道路は川のような状態となった。土石流の発生に伴って、谷筋に設けられた道路の多くは、大量の岩石や土砂の流路となった。特に、死者74名のうち41名が八木3丁目(図3)に集中していた^{2,7)}。住民の証言^{8,9)}によると、八木3丁目の県営緑ヶ丘住宅に流下した土石流の動態は以下のとおりであった(写真2, 3)。

20日午前3時30分頃、地震のような揺れと、聞き慣れない音に異変を感じた。その直後に大きな音とともに土砂が窓を突き破って室内に侵入し、衝撃で体が浮いた。山側に面した部屋では大人が

首まで埋まっていた。埋まった家族を途中まで引き上げていたところ、ドドドドと戦闘機が飛ぶような音がして、再び土砂が流れ込み顔まで埋まりそうになった。4時ごろになって、被害を確認していたら再び大きな音がして、泥が飛び込んできた。

このように、緑ヶ丘住宅を襲った土石流は3回にわたって発生した。平成26年広島豪雨災害合同緊急調査団調査報告書など^{2,3)}によると、この地区の土石流は少なくとも3回発生し、横幅約15mで流下し、総流出土砂量は33,000m³、土砂の平均粒径は0.3mと評価された。なお、県営緑ヶ丘住宅の裏山を流れる上山川は広島県砂防課¹⁰⁾により土砂災害危険溪流(箇所番号I-1-9-303)に指定されていた。

3. 土石流の1次元数値シミュレーション

3.1 土石流の1次元数値シミュレーション

災害時の現象を再現するため、上山川を対象に土石流の1次元流動シミュレーションを行った。シミュレーションでは、崩壊が土石流化して流下した区間をシミュレーションの対象とした。高岡らの研究^{11,12)}をもとに、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へ侵食され、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した。さらに、土石流の流れを開水路非定常1次元漸変流として取り扱った¹³⁾。その基礎式を以下に示す。



写真2 谷出口の住宅街の状況(上流より下流を望む)



写真3 谷出口付近の被災状況(下流より上流を望む)

$$\text{運動方程式: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(vQ)}{\partial x} = -gBh \frac{\partial H}{\partial x} - (B+2h) \frac{v^2}{\phi^2} \quad (1)$$

$$\text{全相の連続式: } \frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = hi_s + Bi_b + q_{\text{in}} \quad (2)$$

$$\text{固相の連続式: } \frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(C_T Q)}{\partial x} = C_* hi_s + C_* Bi_b + q_{\text{sin}} \quad (3)$$

$$\text{河床の変動式: } \frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (4)$$

$$\text{側岸の変動式: } \frac{\partial B}{\partial t} - i_s = 0 \quad (5)$$

ここに、 t : 時間 (sec), Q : 全流量 (m^3/sec), x : 河床に沿った上流端からの距離 (m), v : 断面平均流速 (m/sec), θ : 河床勾配 ($^\circ$), g : 重力加速度 (m/sec^2), B : 流路幅 (m), h : 水深 (m), H : 水位 (m), ϕ : 流速係数, i_s : 側岸の侵食速度 (m/sec), i_b : 河床の侵食・堆積速度 (m/sec), q_{in} : 側方からの全流入流量 (m^2/sec), C : 断面平均濃度, C_T : 流砂濃度, C_* : 最密充填濃度, q_{sin} : 側方からの流入土砂量 (m^2/sec), z : 河床高 (m) である。

ただし、水位 $H = z + h$ である。濃度分布を一定と仮定し、 $C = C_T$ とした。未知数は z, B, h, C_T, Q の5つで、5つの方程式から求めることができる。

次に、侵食・堆積速度に関して、高岡¹¹⁾により提案されている侵食・堆積速度式を用いた。河床の侵食・堆積の判定は平衡流砂量式から求められる平衡流砂濃度と流砂濃度の大小により決定されるものとした。

河床の侵食速度:

$$\text{if } C_T < C_{T\infty} \text{ then } i_b = k_b (C_{T\infty} - C_T)^p \cdot v \quad (6)$$

河床の堆積速度:

$$\text{if } C_T > C_{T\infty} \text{ then } i_b = -k_b (C_T - C_{T\infty})^p \cdot v \quad (7)$$

側岸の侵食速度: $i_s = k_s \cdot v \quad (8)$

ここに、 $k_b = 0.01$, $k_s = 0.01$, $p = 0.7$ とした。 $k_s = 0.01$ は Takaoka et al.¹²⁾ が水俣の土石流計算の際

に用いた値である。

平衡流砂濃度 $C_{T\infty}$ は以下の式を用いて求めた。

$$\text{平衡流砂濃度: } C_{T\infty} \approx \frac{Bq_{s\infty}}{Q} \quad (9)$$

$q_{s\infty}$ は単位幅あたりの平衡流砂量で、広範な流砂形態に利用可能な式として橋本らの式¹⁴⁾を用いた。平衡流砂量:

$$\frac{q_{s\infty}}{\sqrt{s}gd^3} = \frac{\bar{u}_s}{u_*} \tau_*^{3/2} \left(1 - \frac{\tau_* c}{\tau_*}\right) \frac{1}{(\alpha - I_T) \cos \theta} \cdot G \left(I_T, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) \quad (10)$$

ここに、

$$G \left(I_T, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) = 1 + 0.1 \left(\ln \left(\frac{h}{d}\right)\right)^2 (I_T)^{-0.8} \exp \left\{ -2.5 \left(\frac{w_0}{u_*}\right)^{0.5} \right\}$$

さらに、 s : 水中比重, g : 重力加速度 (m/sec^2), τ_* : 無次元掃流力, I_T : エネルギー勾配, w_0 : 粒子の沈降速度 (m/sec) である。また、 $\alpha = 0.875$, $\bar{u}_s/u_* = 4.7$ である。

これらの式を差分化して計算を行った。計算条件を表2に示す。

上流端における流量 Q と流砂濃度 C_T の境界条件は高岡、永野のモデル^{11, 13)}を用いた。すなわち静止した土量 V_s が崩壊により一瞬のうちに流

表2 計算条件

時間刻み $\Delta t(\text{sec})$	0.25
空間刻み $\Delta x(\text{m})$	10
崩壊土量 $V_s(\text{m}^3)$	4,000
崩壊継続時間 $T(\text{sec})$	60
源頭部の土石流流量 $Q_0(\text{m}^3/\text{sec})$	156
源頭部の土石流の土砂濃度 C_0	0.3
堆積層の最密充填濃度 C_*	0.7
堆積層の平均粒径 $d(\text{m})$	0.3
河床堆積層厚 $D(\text{m})$	2
流速係数 ϕ	5

量 Q 、流砂濃度 C_0 の土石流に変換され T 時間継続するものとした。従って、

$$\text{崩壊時間外 } (t < t_i, t_i + T < t) \\ Q = Q_{w0}, C_T = 0 \quad (11a)$$

$$\text{崩壊時間内 } (t_i \leq t \leq t_i + T) : \\ Q = Q_{w0} + Q_0, C_T = \frac{C_0 Q_0}{Q} \quad (11b)$$

$x=0$ 地点の上流域から流入した洪水流量：

$$Q_{w0} = \frac{1}{3.6} frA_0 \quad (12)$$

崩壊により発生した土石流の流量：

$$Q_0 = \frac{C_* V_s}{C_0 T} \quad (13)$$

ここに、 Q_{w0} : $x=0$ より上流域から流入した雨水流量 (m^3/sec)、 Q_0 : 崩壊により発生した土石流流量 (m^3/sec)、 T : 崩壊継続時間、 t_i : 崩壊開始時刻、 f : 流出係数、 r : 時間雨量 (mm/h)、 A_0 : $x=0$ 地点の上流域の集水面積 (km^2) である。

初期条件として河床高、川幅を与えた。初期川幅は、各河道地点における流域面積をもとに評価した¹⁵⁾。初期洪水流量は、合理式により評価し、河道に沿って横流入させた。

$$Q = \frac{1}{3.6} frA \quad (14)$$

また、流速係数は $\phi=5$ とした。

計算対象の上山川の河床堆積層の平均粒径 d は不明であったため、上山川に近接する溪流 (太田川支川 75) における堆積土砂の調査結果³⁾を参考に $d=0.3m$ とした。河床堆積層厚の評価は困難であるので、一様に堆積層厚 $D=2m$ と仮定した。河床堆積層厚は侵食可能な河床の層厚であり、 $2m$ より下層には岩盤が存在するとして、河床堆積層

以上には河床侵食が起こらないものとした。河床堆積土砂の最密充填濃度は $C_* = 0.7$ とした。

上山川で発生した土石流は、合計3回発生したと言われている。しかし、3回の土石流発生の原因となった各崩壊地における崩壊土砂量を、正確に評価することは困難である。そのため本研究では、1回の土石流の発生で代表することとし、現地調査結果にほぼ等しい流出土砂量となる崩壊土砂量を明らかにした。

計算対象の時間は、8月20日2時30分から4時30分までの2時間とし、崩壊の発生は3時30分とした。

3.2 数値シミュレーションの結果と考察

数値シミュレーションの結果と現地調査との比較を表3に示す。

現地調査によると²⁾、土石流は3回発生したと言われ、その総流出土砂量は $33,000m^3$ と評価されている。一方、数値シミュレーションによると、崩壊土量 $4,000m^3$ の条件下で発生した土石流の流出土砂量は $30,000m^3$ となり、現地調査結果と概ね一致する。

土石流の流下に伴って著しい河岸・河床侵食が生じ、大量の土砂とともに流木が生産された。そこで、2.2節で述べた側岸上の植生調査の結果と、本章の数値シミュレーション結果に基づき流木の流出量を求める。侵食された側岸上に、以前は植生が存在していたと仮定すると、流木の発生本数は $24,000m^2 \times (70 \text{本}/100m^2) = 16,700 \text{本}$ 、流木の実質流出量は $\pi (8.6cm/2)^2 \times 6.4m \times 16,700 \text{本} = 620m^3$ 程度であったと推測される。

次に、数値シミュレーションにより得られた土

表3 計算結果と現地調査との比較

諸値	計算値	現地情報
谷出口($x=1000m$)でのピーク流量(m^3/sec)	950	—
谷出口($x=1000m$)での最大流速(m/sec)	18	—
断面 I ($x=390m$)における土石流通過後の川幅(m)	8.3	9.1
$x=800m$ での最大水深(m)	17	10
谷出口($x=1000m$)での最大水深(m)	5.4	—
流出土砂量(m^3)	30,000	33,000
流木の実質流出量(m^3)	620	—

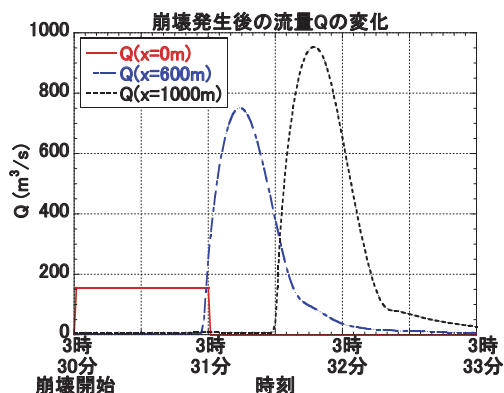


図5 O_m, A, B 地点でのハイドログラフのシミュレーション結果

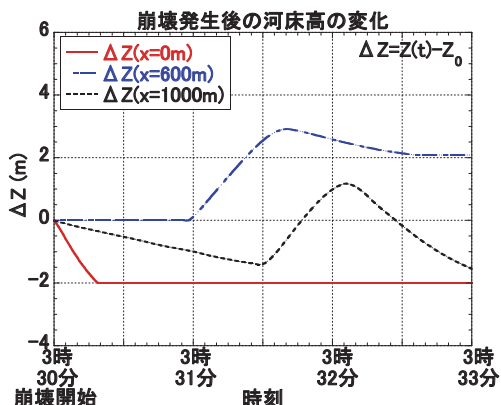


図7 O_m, A, B 地点での河床の時間変化のシミュレーション結果

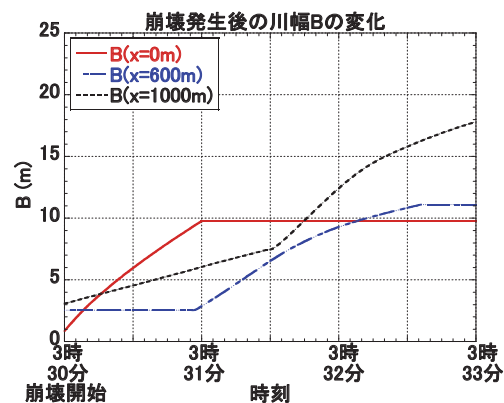


図6 O_m, A, B 地点での川幅の時間変化のシミュレーション結果

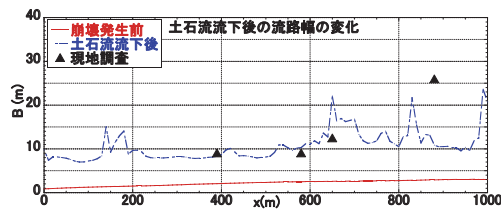


図8 土石流流下後の川幅のシミュレーション結果と現地調査結果との比較

石流の動態を述べる。図5は、数値シミュレーションにより求められた流量ハイドログラフを、同じく図6は川幅の時間的な変化を、図7は河床高の変化をそれぞれ示したものである。

3時30分から3時31分までの $T=1$ 分間を源頭部 O_m ($x=0m$)における崩壊に起因した土石流の継続時間と設定している。源頭部 O_m ($x=0m$)では土石流の発生に伴い、川幅は約10mまで拡大し、河床は2m侵食され、岩盤が露出した(図6, 7)。土石流は発生後55秒で地点A ($x=600m$)に到達し、15秒後の3時31分10秒に最大水深約14.5mとなった。その5秒後の3時31分15秒には最大流量約750 m^3/sec となった。地点Aでは土石流が到達するまで、側岸と河床に変化は見られ

なかった。しかし、土石流が到達すると側岸は90秒間で約11mまで拡大し、一方で河床は2m近く堆砂していた。土石流は発生後90秒で地点B ($x=1,000m$)へ到達した。ピーク流量は約950 m^3/sec (3時31分45秒)で、この時水深は約5mであった。また、数値シミュレーション終了後(4時30分)の川幅は約21mであった。地点Bでは、土石流の到達前に側岸・河床の侵食が既に発生していたが、土石流の到達直後、側岸の侵食速度はそれまでの約4倍に増加し、河床には堆積が発生した。土石流は地点A, B通過時に、側岸を大きく侵食する一方で、河床には約3mの土砂を堆積させた。そしてピーク流量を記録した後、流量の減少に伴って河床高の変化は堆積から侵食へと推移し、側岸の侵食速度も土石流が到達する前の速度へと緩やかに変化した。

図8は、数値シミュレーションにより得られた土石流流下後の川幅を、現地調査結果と比較したものである。川幅の値は現地調査を行った断面が

台形であったため、側岸を含む上面と河床との平均値を算出しプロットした。シミュレーションの結果は現地と概ね近い値が得られた。

水深に関しては、断面IV付近($x=800\text{m}$)で10mの水位痕跡²⁾が確認され、谷出口(地点B, $x=1000\text{m}$)では住宅の1階部分を越える水深痕が残っていた。従って、シミュレーション結果は概ね妥当であったと考えられる。

4. 安佐南区八木地区における災害時系列

高瀬での時間雨量、玖村(太田川)での観測水位と災害の時系列を図9にまとめた。高瀬、玖村はそれぞれ、八木3丁目に近い観測所である(図1)。図9中の土石流水位は、3.2節で述べた上山川の谷出口における数値シミュレーションの結果である。最大値は約5mとなった。ここに、その時刻は目撃情報^{8,9)}をもとに、1回目の土石流が発生したとされている8月20日の3時30分とした。

八木地区における災害時系列を述べる。19日の18時より降り出した雨により、21時26分に大雨洪水警報が発表された。その後、降雨は一時終息し、洪水警報は23時33分に解除された。20日になり、再び雨が降り始め、0時57分に洪水警報が再発表された。雨は強さを増し、1時15分には土石流災害警戒情報が発表された。3時に最大時間雨量87mm/hが記録され、3時30分に広島市災害対

策本部が設置された。県営緑ヶ丘住宅に1回目の土石流が到達したのもこの時間帯であったと言われている^{8,9)}。シミュレーション結果より、発生した土石流は秒速10m前後で谷を流下し、90秒で住宅街へ到達した。谷出口における水深は5mで、住宅の1階部分に被害が集中した。3時40分、八木地区では土石流に関する119番通報が急増した。安佐南区が避難勧告を発令したのは4時30分で、1回目の土石流から既に1時間が経過していた。

また、太田川の水位が最大となる前の水位上昇時に、既に山地溪流では、土石流が発生していた。

5. おわりに

以上、2014年8月20日、広島市安佐南区八木3丁目の上山川を流下した土石流について再現シミュレーションを行った。

その結果、まず、崩壊土砂量を $4,000\text{m}^3$ と想定すると、県営緑ヶ丘住などを直撃した土石流の流出土砂量は $30,000\text{m}^3$ と見積もられた。その多くは、溪流河岸の侵食が原因で発生した。さらに流出流量は 620m^3 (実質量)と評価された。

土石流は溪流の河岸を大きく侵食しながら流下した結果、谷出口では川幅約21mが記録され、ピーク流量は約 $950\text{m}^3/\text{sec}$ だった。土石流の水深は、谷出口で5mと評価され、住宅の1階部分に被害が集中したことに対応した。また、崩壊の発

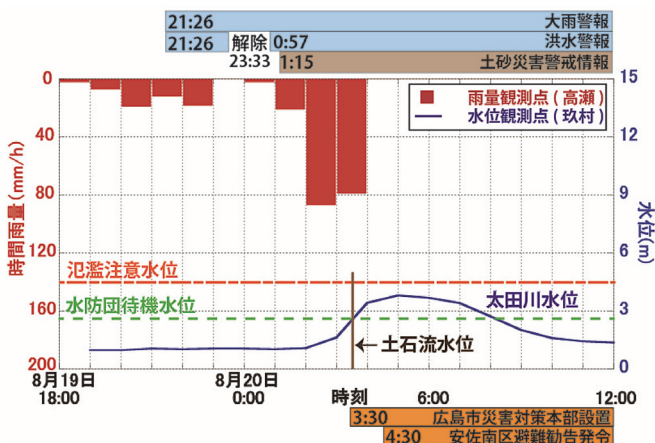


図9 高瀬、玖村の降雨・水位と災害の時系列

生から下流の住宅地まで到達するまでの時間は約90秒であった。

安佐南区では20日の1時15分に土砂災害警戒情報が発表され、3時30分に広島市災害対策本部が設置された。県営緑ヶ丘住宅に1回目の土石流が到達したのも3時30分ごろであった。同区が避難勧告を発令したのは4時30分で、既に土石流による被害が発生した後だった。

これらの原因が重なったことで甚大な被害が発生した。また、太田川の水位上昇の途中において、既に山地の溪流では洪水、土石流が発生していた。

謝辞

本研究に際して八木地区の住民の方々に災害時の資料等を提供していただいた。現地調査では、本学技術職員の池松伸也氏に多大な助力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 広島市災害対策本部：平成26年8月19日からの豪雨災害への対応について（10月6日9時現在），2014.
- 2) 土木学会・土木学会中国支部・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.
- 3) 海堀正博，石川芳治，里深好文，松村和樹，中谷加奈，長谷川祐治，松本直樹，高原晃宙，福塚康三郎，吉野弘祐，長野英次，福田真，中野陽子，島田徹，堀大一郎，西川友章：2014年8月20日に広島市で発生した集中豪雨に伴う土砂災害，砂防学会誌，Vol.67, No.4, pp.49-59, 2014.
- 4) 竹林洋史，藤田正治：2014年8月に広島市安佐南区八木三丁目で発生した土石流の流動特性．自然災害研究協議会中国地区部会研究論文集，第1号，pp.31-34, 2015.
- 5) 国土交通省：川の防災情報，<http://www.river.go.jp/>，2014.
- 6) 気象庁：過去の気象データ検索，<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>，2014.
- 7) 広島市：8.20豪雨災害における避難対策等検証部会：平成26年8月20日の豪雨災害避難対策等に係る検証結果，2015.
- 8) 読賣新聞，2014年8月23日，日刊，34面，2014.
- 9) 西日本新聞，2014年8月21日，日刊，1面，2014.
- 10) 広島県砂防課：土砂災害ポータルひろしま，

<http://www.sabo.pref.hiroshima.lg.jp/portal/top.aspx>，2014.

- 11) 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，2006.
- 12) H. Takaoka, H. Hashimoto and M. Hikida：Simulation of landslide-induced debris flow-The Atsumari debris flow disaster in Minamata City, Japan, Debris-Flow Hazards Mitigation：Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of Fourth International Conference, pp.353-363, 2007.
- 13) 永野博之：山地流域における崩壊，土石流，流砂現象による土砂流出に関する研究，九州大学博士論文，2012.
- 14) 橋本晴行：土砂の移動現象とそのメカニズム，ながれ29, pp.193-202, 2010.
- 15) 橋本晴行・渡辺勝利・全柄徳・上野賢仁・山中稔・笠井美青・野上昭治・緒方勤：リモートセンシングを用いた嘉瀬川ダム流域の被覆状況調査と流出土砂量の推定，水工学論文集，第45巻，2001.

(投稿受理：平成27年4月10日)

