

熊野那智大社後背山地において発生した土石流に関する研究

Study on debris flow disaster occurred on mountain behind Kumano Nachi Shrine

赤澤史顕¹・藤本将光²・里深好文³・深川良一³

Fumiaki Akazawa, Masamitsu Fujimoto, Yoshifumi Satofuka and Ryoichi Fukagawa

¹立命館大学大学院 理工学研究科 博士課程後期課程 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Doctoral Program, Graduate School of Science and Engineering, Ritsumeikan University

²立命館大学助教 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Assistant Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

³立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Kumano Nachi Shrine is a part of World Heritage in Wakayama Prefecture. In the mountain behind Kumano Nachi Shrine, a debris flow disaster occurred on September 4, 2011 by heavy rain. This debris flow flowed into Shrine and deposited in the ground of Shrine. We simulated this disaster by using Knako2D debris flow simulator. We compared results of simulation and situation of this disaster. This comparison shows our simulation is almost same with situation of disaster. In addition, we consider the effective sabo works for this disaster. It is difficult to prevent this disaster only constructing sabo dam. In the result, it showed that sabo dam using with training dike is effective countermeasure to prevent of this debris flow disaster.

Keywords : *debris flow, numerical simulation, Kumano Nachi shrine, sabo dam, training dike*

1. はじめに

和歌山県東牟婁郡那智勝浦町にある熊野那智大社は、ユネスコの世界遺産「紀伊山地の霊場と参拝道」の構成資産の一部であり、国の重要文化財として指定されている。平成23年9月の台風12号はこの熊野那智大社がある那智川流域に一時間最大123mm、総雨量821mm（那智勝浦町市野々観測所）の豪雨をもたらした。この豪雨により、二級河川那智川水系那智川が溢水氾濫し、那智川流域で死者・行方不明者は23名、全壊・半壊・床上浸水を合わせ569戸の甚大な被害を生じた。この災害を契機として那智川流域では、河川災害復旧助成事業により、那智川の河道断面の拡幅、護岸の築造、橋梁の架け替えなどが予定され、実施されている。

一方、那智川流域の上流部に位置する熊野那智大社においてもこの豪雨により、境内にある社殿のうち「御本殿」と「八社殿」との間の裏山斜面から土石流が流入し、多くの社殿周辺にまで土砂が流入するなどの被害を生じた。また結果的に人的な被害は報告されていないものの、熊野那智大社は世界遺産の一部であり、多数の観光客も訪れるため、再び今回のような事が起これば、甚大な人的被害が生じることが懸念される。そのため、熊野那智大社後背流域から発生する土石流に対する根本的な対策が望まれる。

このような土石流災害による被害を防止・軽減する有効な手法の一つとして、砂防ダムなどの砂防構造物の建設が挙げられる。しかし、近くには国の名勝である那智大滝も存在し、大規模な砂防ダムの建設は景観に対する影響が懸念されるため、その大きさには制約がある。

本研究では、今回の豪雨により熊野那智大社に流入した土石流の氾濫に対して、数値シミュレーションによる再現計算を行った。計算に使用した数値シミュレーションモデルはこれまでの研究により、土石流の氾濫・堆積に関して精度良く再現できることが確認されている¹⁾。そして、砂防構造物の建設によりその氾濫の規模や土砂流入量の軽減に関して、どの程度効果があるのかを、その数値シミュレーションモデルを用いて検証した。

2. 台風12号による熊野那智大社の被害の概要

熊野那智大社後背山地の小流域は、流域面積約0.19km²で、地質としては流域全体が熊野酸性岩類であり珪酸成分の多い花崗斑岩が80～90%を占めている。流域の上流部は標高700m程でそこから標高340m付近に位置する熊野那智大社まで長さが約1km、平均河床勾配20度の溪流が流れている。台風12号はこの流域に多量の降雨をもたらした。図1は熊野那智大社に設置されている雨量計によって観測された雨量を示しており、9月2日午前2時から降り始め、9月2日午前0時から9月4日午後24時まで累積雨量690mm、9月4日の午前4時には最大時間雨量93mm/hrを記録した。この豪雨により、当該溪流の源頭部で崩壊が起こり、その下流まで土石流が流れたことが痕跡から確認されている。一方、熊野那智大社のすぐ裏の斜面では立木が流れによりほとんど倒されていないことから、土砂を多量に含んだ流れではなく比較的土砂濃度が小さい多量の水により裏斜面の土砂の一部が侵食され熊野那智大社に流入したものと考えられている。

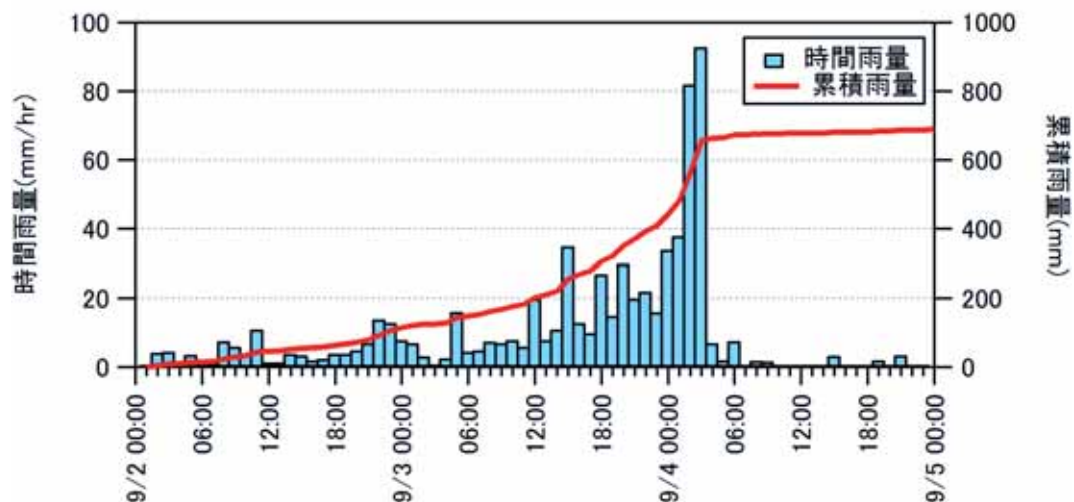


図1 時間雨量と累積雨量（熊野那智大社雨量計）



図2 災害発生時の流れ



図3 熊野那智大社拝殿前の状況

この溪流は普段、図2に示しているように、熊野那智大社裏の斜面において南東方向に折れ曲がり、南の谷に流れているが、災害発生時は直進して熊野那智大社の方向に水と土砂が流れた。図3は災害発生時の拝殿前の状況を表しており、神社全体に土砂と水が流入し、境内全体にわたって数cmの厚さで土砂が堆積した。図4は災害発生直後の9月4日に撮影されたもので、中央の建物が神社の御本殿であり右にあるのが八社殿である。土砂と水はこの御本殿と八社殿の間の写真左にある斜面から流入し、そのほとんどは斜面直下付近に堆積した。図5は図4と同じ場所で災害復旧後に撮影されたものである。図4と図5の比較から、土砂は斜面の直下で厚いところでは3~5m堆積し、御本殿の半分近くが土砂で埋没している。



図4 御本殿裏の災害発生直後の状況



図5 御本殿裏の災害復旧後の状況

3. 災害時の数値シミュレーション

本研究では京都大学農学研究科のグループが無償公開している土石流シミュレータ「Kanako2D」を用いて計算を行った。Kanako2Dでは土石流の一次元計算と二次元計算を結合モデル²⁾により統合させることにより、谷部での土石流の発達・流下から谷出口より流出した土石流の氾濫過程までを一貫して計算することができる。これまでの研究により、実際の災害事例とKanako2Dによる計算結果が比較され、ほぼ妥当な再現計算が可能であることが示されている¹⁾。本研究でもこのKanako2Dを用いて、神社裏流域の上流部から流量を与えて、神社に流入した土砂と水の氾濫過程の再現計算を行った。

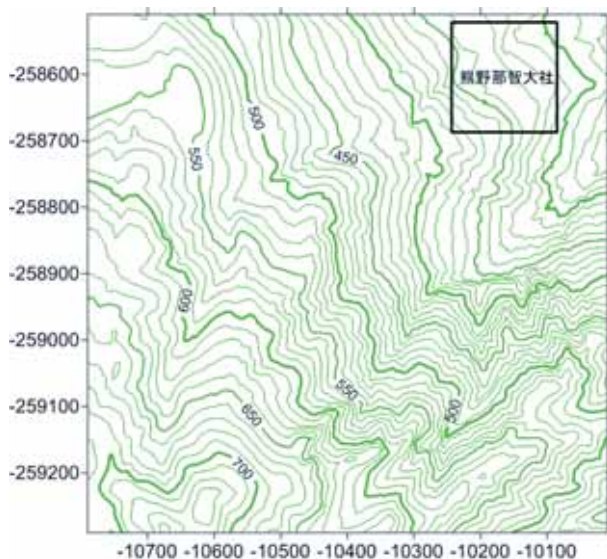


図6 航空LP計測による等高線図

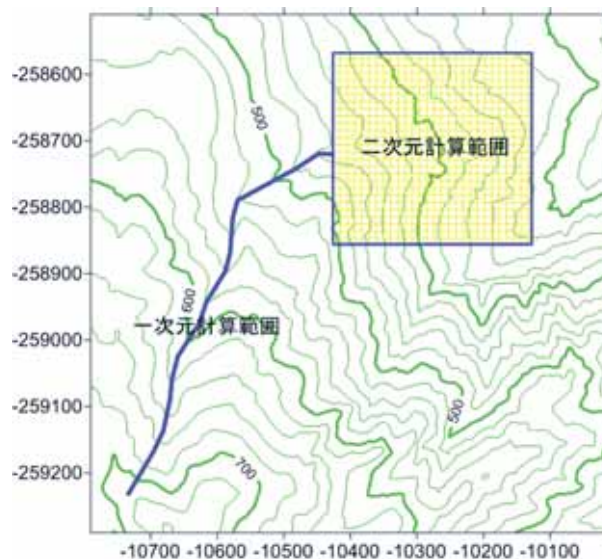


図7 Kanako2Dの計算領域（20m間隔等高線）

(1) 計算地形

計算に用いた地形データは災害発生後に航空レーザープロファイラ計測によって得られた1mメッシュの地形データ（以下、航空LP計測、LPデータと呼ぶ）から作成した。航空LP計測は樹木下の標高を高密度で計測できるため、中山間地での高精度な地形データが得られる。

図6に航空LP計測によって得られた1mメッシュのLPデータにより作成された神社裏流域の等高線図を示す。図の座標の単位はメートルであり、座標値は国土交通省が定める平面直角座標系の6系座標である。等高線の間隔は10m間隔であり、100m毎に太線で示している。また、図には熊野那智大社の場所も示している。図から航空LP計測により山間地での谷などの地形が明瞭に計測されていることがわかる。図7にはKanako2Dによる一次元の計算領域と二次元の計算領域を示している。一次元計算領域と二次元計算領域の接続部は扇頂部付近としている。二次元計算領域には1mメッシュのLPデータから、図8に示すような5mメッシュの地形データを作成し計算の初期地形条件として与えた。図8は図7の二次元計算領域を拡大し、等高線間隔5mで再表示したものである。一次元計算領域ではLPデータより、10m間隔で縦断線上の標高をとり、これを初期河床として計算を行った。

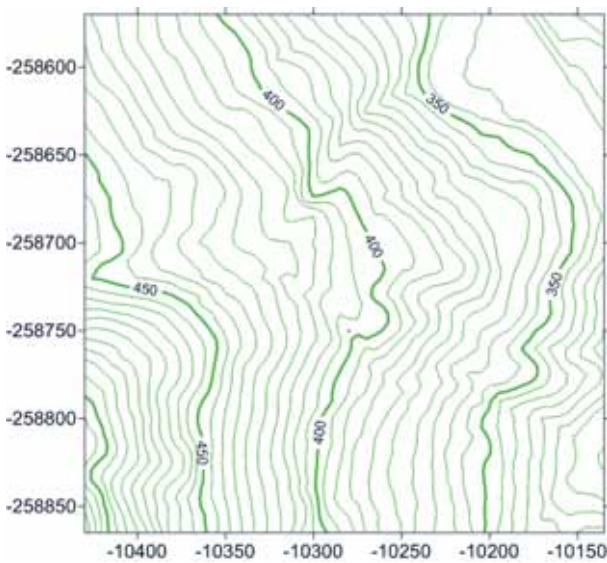


図8 二次元計算領域（5m間隔等高線）

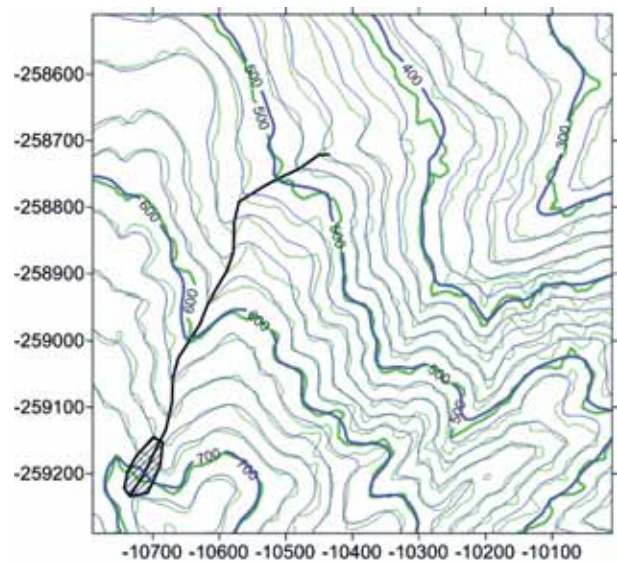


図9 縦断線の位置

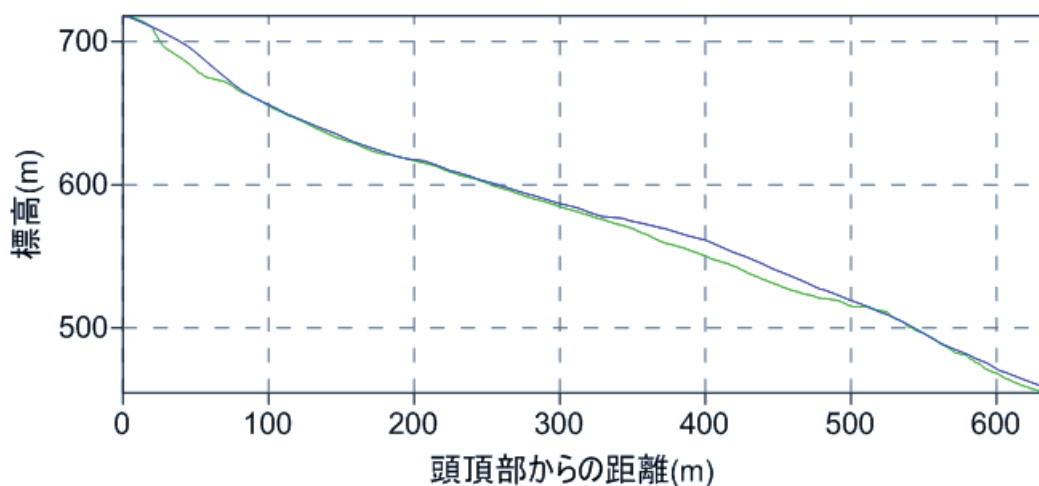


図10 流域頭頂部からの縦断線（緑がLPデータ、青がDEMデータ）

図9にはその縦断線の平面位置とLPデータと、後述するDEMデータを重ね合わせたものを20m間隔の等高線で示している。図9に示した縦断線の位置は図7の一次元計算範囲と同じ位置であり、等高線はLPデータによるものを緑で、DEMデータによるものを青で示している。図10は図9に示した黒線（縦断線）上のLPデータとDEMデータによる標高値を比較したものである。DEMデータは数値標高モデルであり、地点毎の標高を示している。本研究で用いたDEMデータは国土地理院の基盤地図情報の10mメッシュDEMデータである。基盤地図情報のDEMデータは場所によって測量法が異なるが本研究が対象としている地域では写真測量によって測量された標高から作成されたものである。このDEMデータは写真測量のため樹木の高さを考慮してはいるものの、樹木下の標高を直接計測しているわけではないため、最大で5m程度の誤差³⁾がある。災害後のLPデータと災害前のDEMデータを比較すると、図10に示すように最大で10m以上の差がある。災害後と災害前のデータの比較をしているため、災害時に10m前後侵食されたと解釈できるかもしれないが、現地の侵食状況から10m以上も侵食された場所はないことと、写真測量による樹木下の標高の測定は、溪流のように地形が急峻な場所において、精度がさらに悪くなることが想定されるため、このDEMデータを計算に用いないことにした。本来ならば再現計算は災害前の地形データを初期条件とし、これに降雨条件を与えて土石流の氾濫計算を行い、災害後の地形との比較を行うのが望ましいが、災害前のLPデータが無いので、今回はこのような方法をとらなかった。そのため、本計算では災害後に計測されたLPデータから初期河床形状を設定し、この上に初期堆積土砂厚を一律に1m与えて計算した。この土砂厚の設定に際しては、災害後の著者らによる調査において河道部の侵食深が概ね1mであったことを参考にした。

(2) 流入条件

那智大社に設置されていた雨量計の観測結果をもとに、次の合理式⁴⁾を用いて流入条件を決定した。

$$Q_p = \frac{1}{3.6} f_p r A \quad (1)$$

ここに、 Q_p ：ピーク流量 (m^3/s)、 f_p ：流出係数、 r ：降雨強度 (mm/hr)、 A ：流域面積 ($=0.2\text{km}^2$) である。流出係数は $0.7^4)$ とし、降雨強度は観測された最大時間雨量 $93\text{mm}/\text{hr}$ としている。この式より下流でのピーク流量は $3.61\text{m}^3/\text{s}$ と算出された。ピーク流量が生じる時間については以下の自然流域での洪水到達時間の式⁵⁾を用いて決定した。

$$t_p = 1.67 \times 10^{-3} (L / \sqrt{S})^{0.7} \quad (2)$$

ここに、 t_p ：洪水到達時間 (h)、 L ：流路延長 (m)、 S ：平均流路勾配である。この式よりピーク流量が発生する時間は 0.2h (720s) が算出された。

入力する土砂量は源頭部から計算を行うので無いものとした。現地調査によると源頭部崩壊によって発生した崩土は比較的大きな岩塊がほとんどであり崩壊の直下に大部分が停止・堆積していた。そこで、源頭部からの土砂の流入は考えないものとし、給水のみを与える計算を行った。

以上の条件により、ピーク流量は $3.61\text{m}^3/\text{s}$ 、洪水到達時間は720sとし供給流量を以下の図11のように設定した。

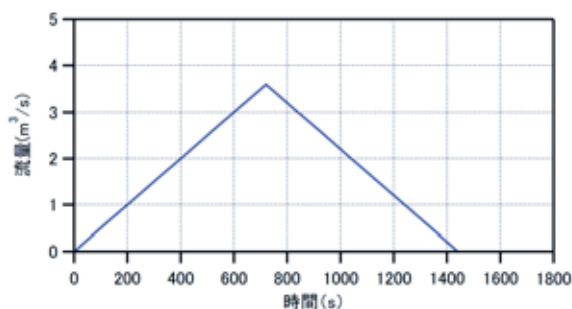


図 11 入力した流量グラフ

(3) 計算条件

数値計算に用いた各パラメータ値を表1に示す。

表1 計算に用いたパラメータ

パラメータ	数値	堆積速度係数	0.05
計算時間(s)	1800	マンニングの粗度係数	0.03
計算の時間間隔(s)	0.01	1次元の計算点間隔(m)	10
土砂の粒径(m)	0.45	1次元領域計算点個数	65
砂礫の密度(kg/m ³)	2650	2次元のx計算点間隔(m)	5
流体相密度(kg/m ³)	1000	2次元のy計算点間隔(m)	5
河床の容積濃度	0.65	2次元のx方向計算点個数	60
重力加速度(m/s ²)	9.8	2次元のy方向計算点個数	60
侵食速度係数	0.0007		

(4) 計算結果と考察

上述の計算条件のもとで計算を行い、計算終了時（1800s）における二次元領域での計算結果について考察を行った。図12は二次元計算領域における900秒後における堆積厚と観測線の位置を示している。ただし、神社の境内において本計算では建物の影響を考慮してないため、この図においては溪流部のみの縦断線を示すにとどめている。この計算結果から上流から流れてきた水と土砂は図3に示したように南の谷へ向かう流れの方向ではなく、主に神社のある方向に流れていき、神社付近で水と土砂が氾濫したことがわかる。図13には図12の赤線で示したラインに沿った縦断形状を示しているが、前述のように建物の影響を考慮していないことに注意を要する。図13から神社裏の斜面直下で最大4mの土砂が堆積したことがわかり、図4、図5と比較すると災害時の状況を概ね再現できているといえる。また、計算結果より神社付近40m×40mの範囲には土砂量で約1800m³堆積したことがわかった。この計算結果から、今後も大規模な降雨の際には水と土砂は神社の方向に流れる傾向を持ち、再び同様の被害が発生する可能性があるため、これに対し何らかの対策を講じる必要があるということがわかった。

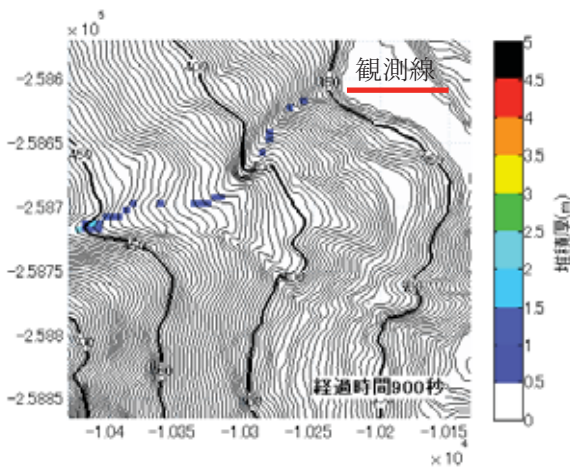


図12 900秒後の堆積厚と観測線の位置

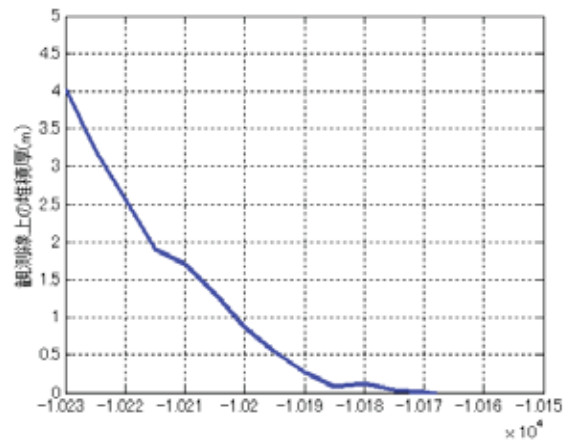


図13 観測線上の堆積厚（1800秒後）

4. 数値シミュレーションを用いた対策法の検討

熊野那智大社の土砂氾濫に対する対策法について検討するため、上流域に不透過型砂防堰堤のみを設置した場合と、不透過型砂防堰堤と導流工の両方を設置した場合の計算を行った。不透過型砂防堰堤のみを設置する場合においては、高さが8mの場合と16mの場合の二通りの計算を行った。不透過型砂防堰堤は上流から流出してくる土砂を堰堤に捕捉することで、下流への土砂流出を減少させる目的で山地河川に設置される構造物である。不透過型堰堤については、頭頂部から下流600mの位置に、1基設置した。導流工は溪流から水や土砂があふれださないよう流向を制御して下流に流下させる構造物である。導流工については二次元計算領域において土石流流下時に流れの向きが急変した場所に災害前の流れの方向に配置した。検討したケースについてまとめると以下の表2ようになる。初期河床形状および流入流量等の条件は前章の再現計算と

基本的には同じ条件の下で、構造物が設置されていた場合について計算を行い、その効果を検討した。

表2 検討したケース

Case	条件
Case1	8m不透過型砂防堰堤
Case2	16m不透過型砂防堰堤
Case3	8m不透過型砂防堰堤＋導流工

(1) 不透過型砂防堰堤のみ設置した場合 (Case1, Case2)

図15にはCase1、2、3の計算終了時における堆積厚の縦断分布を示している。なお、この縦断図は図12の観測線に沿った堆積形状である。青の点線は図13に示した線（構造物がない状態）であり、赤線はCase1、緑線はCase2、水色線はCase3の堆積厚をそれぞれ示している。図14にはその不透過型砂防堰堤の位置を示している。計算結果より8mの堰堤がある場合とない場合とで堆積厚がほとんど変わらず、神社の周りに堆積する土砂量を減少させる効果があまりないことがわかった。一方、16mの堰堤は最大の堆積厚が2.7mとなり、堰堤がない場合と比べて1.3m堆積厚が減少し、神社まで到達する土砂量を減少させる効果があることが分かった。神社付近40m×40mの範囲に堆積した土砂量は8mの堰堤の場合で1650m³、16mの堰堤の場合で1080m³となり、堰堤がない時と比べて、神社付近に堆積する土砂量を8mの堰堤の場合で8%、16mの堰堤の場合で40%減少させる効果があることが分かった。砂防堰堤は高さが高くなるほど下流に流出する土砂を減少させる効果が高いが、高さの大きい堰堤を設置するのは景観に対する影響が懸念されるので、その最適な高さは今後さらに検討する必要があると考える。

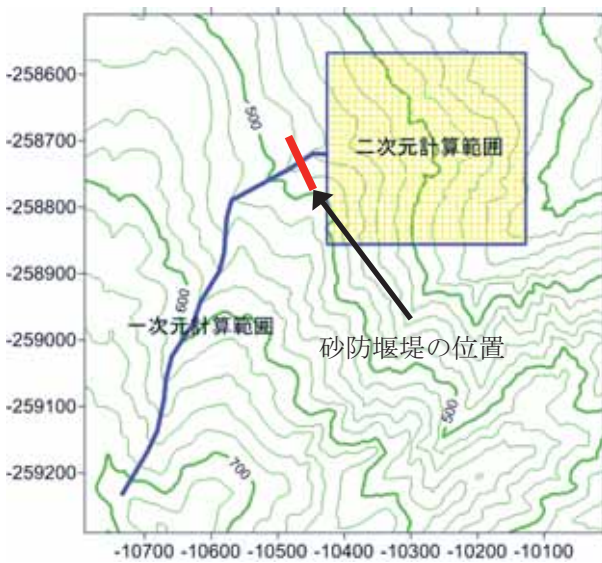


図14 砂防堰堤の位置

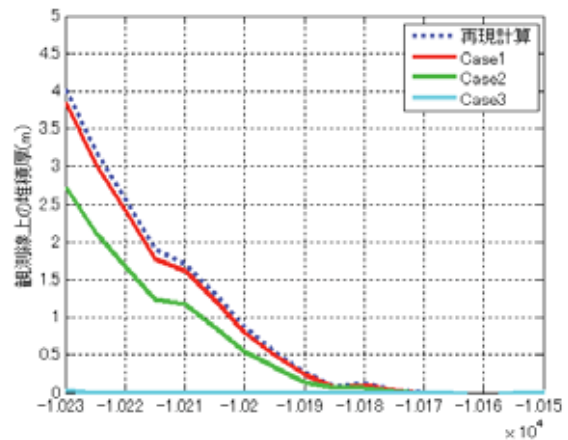


図15 観測線上の堆積厚 (1800秒後)

(2) 8m不透過型砂防堰堤と導流工を設置した場合 (Case3)

図16には導流工を配置した位置を示す。図に示した位置で6m河床をかさ上げし、それを導流工として計算をおこなった。図17は計算開始から1800秒後の水深を表示したものである。導流工により流れの大部分が熊野那智大社の方向ではなく、災害前の流れの方向（南の谷へ向かう方向）に流れていることがわかる。実際には流れが神社の方向に向かっていったため被害を生じたが、その方向を導流工によって制御することにより、上流から来た水と土砂を南の谷へと流すことにより、被害を軽減できる可能性があることがわかった。そのため、図15に示すように土砂も神社付近まで流れることは無く、砂防堰堤と導流工の両方を設置することにより、崩壊土砂量を9m³まで減らせることがわかった。この結果により、砂防ダムや導流工を設置することは被害軽減に有効であることが示された。しかし、今回の災害を超えるような豪雨が降った場合や導流工を超えるような土石流が発生した場合は神社付近に土砂や水が流れてくる危険性がある。

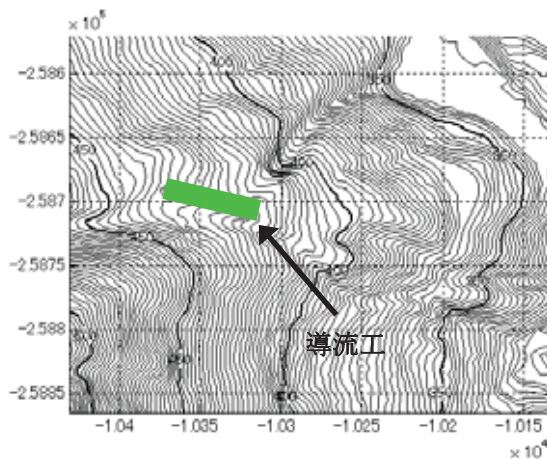


図 16 導流工を配置した位置

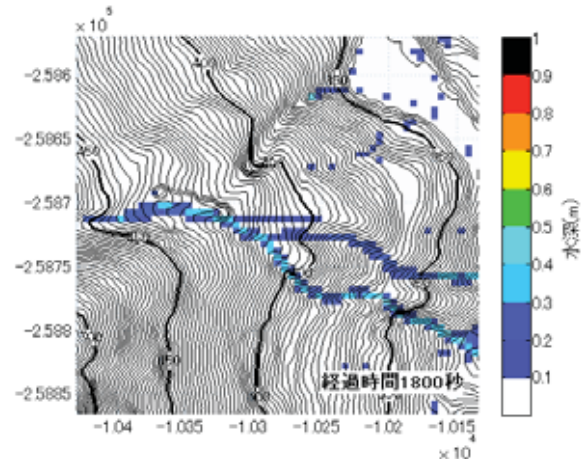


図 17 1800 秒後における水深

5. おわりに

熊野那智大社に流入した土石流の氾濫に対して、Kanako2Dを用いた数値シミュレーションにより再現計算を行った。また、砂防ダム建設によりその氾濫の規模や土砂流入量の軽減に関して、どの程度効果があるのか数値シミュレーションモデルを用いて検証した。その結果を以下にまとめる。

再現計算の結果と熊野那智大社の被害状況とを比較すると両者の相違は大きくなく、再現計算が概ね妥当な結果であることが分かった。また、災害後のLPデータを地形条件として数値シミュレーションを行ったところ、災害前の流出経路とは変わり、今後も神社の方向に水と土砂が流れる傾向を示したため、同様の被害を防ぐための対策を講じる必要があることが分かった。

砂防堰堤の被害軽減効果について検証したところ、8mの砂防堰堤はあまり効果がなく、16mの砂防堰堤は流出土砂量を40%軽減できるという結果になり、ある程度の規模の砂防堰堤が被害を軽減する上で有効であることが示された。景観に配慮した上で砂防堰堤が効果を発揮するような最適な高さは今後とも検討していく必要があると考える。

砂防堰堤と導流工と組み合わせて用いた場合による被害軽減効果について検証したところ、今回のような豪雨による被害を防止・軽減する上で有効であることが示された。しかし、上流から大規模な土石流が発生した場合、導流工を超えて神社の方に流れる可能性があると考えられる。

謝辞：本研究は、地盤工学会関西支部「『想定外』豪雨による地盤災害への対応を考える調査研究委員会」の活動の一環によるものであり、調査の一部は和歌山大学平成24年度独創的研究支援プロジェクトおよび財団法人レントオール奨学財団の支援を受けて行われた。また、熊野那智大社と国土交通省近畿地方整備局より情報およびデータを提供頂いた。ここに付記して、深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 中谷加奈・Sumayrono・里深好文・水山高久：汎用土石流シミュレータKanakoの実地形への適用，水工学論文集，第53巻，pp.703-708，2009.
- 2) 和田孝志・里深好文・水山高久：土石流計算における1次元・2次元シミュレーションモデルの結合，砂防学会誌，Vol.61，No.2，pp.36-40，2008.
- 3) 国土交通省令：地理空間情報活用推進基本法第二条第三項の基盤地図情報に係る項目及び基盤地図情報が満たすべき基準に関する省令，平成十九年八月二十九日国土交通省令第七十八号。
<<http://law.e-gov.go.jp/htmldata/H19/H19F16001000078.html>>
- 4) 高橋裕：河川工学，東京大学出版会，pp. 70，2008.
- 5) 岩佐義朗：河川工学，森北出版，pp. 38-40，1979.