

# 土地利用の高機能化による史跡保全に配慮した土砂災害対策

Counterplans for hazards due to debris flow around a historic site: site considerations

原田紹臣<sup>1</sup>・里深好文<sup>2</sup>

Norio Harada and Satofuka Yoshifumi

<sup>1</sup>三井共同建設コンサルタント株式会社 関西支社 (〒552-0007 大阪市港区弁天1丁目2番1-1000号)

Chief Engineer, Mitsui Consultants Corporation

<sup>2</sup>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

Care must be taken to preserve historic relics as the surrounding infrastructure changes. The site of the Omi Jingu shrine requires an evaluation for debris flow and prevention measures. However, installation of conventional large-scale protective structures may disturb or obstruct the historic site. Thus, we propose the use of a small-scale debris-flow steel-grid sabo dam. Using this approach, the parking lot could be used for debris flow deposition. In this study, to identify the ideal structure for controlling sediment runoff, we experimented with the structure of the dam to show how the capture rate is affected under different conditions.

**Keywords :** debris flow, debris flow deposition, experiment, Omi Jingu shrine, steel-grid sabo dams

## 1. はじめに

平成23年に那智大社において発生した土砂災害<sup>(例えば<sup>1</sup>)</sup>の教訓から、史跡に隣接して土石流危険溪流等が存在する場合、将来にわたって史跡を保全するための土砂災害対策が必要であると考えられる。しかしながら、史跡に隣接した場所において不透過型コンクリートダム等に代表される大規模なコンクリート製の構造物を構築した場合、観光地としても価値の高い史跡の良好な景観を阻害する恐れがある。

現在、神社建築の代表として平成10年度より国の登録文化財に指定されている近江神宮(写真1)では、本殿や内外拝殿に隣接する地すべりブロック(図1)の移動や背後の溪流からの土石流発生に伴う土砂災害が懸念されており、構造物による土砂流出防止が求められている。なお、従来の施設による土砂災害対策を講じる場合、土砂流出防止のために谷部分に砂防堰堤を設け、その下流に流水を排出するための流路工を設けることが一般的である。しかしながら、国の登録文化財である近江神宮内において流路工等の大規模な工事を行うことは史跡や観光資源としての景観を阻害することが予想されることから、神宮関係者との円滑な合意形成にも困難を生じることが懸念される。

そこで、筆者らは近江神宮における土砂災害防止を目的に、従来の透過型砂防堰堤等に代表される大規模な砂防堰堤の代替施設として、周辺景観への影響を軽減することを目的に小規模化を図った鋼製部材によって構成される土石流フェンスを提案している<sup>2)</sup>。土石流フェンスの概要図を図2に、一般的な透過型砂防堰堤による土砂捕捉事例および提案する土石流フェンスとの形状規模の比較について図3に示す。本研究では、土石流フェンスの鋼製部材間隔(透過幅)や鋼製部材の最適な断面構造に関して、格子部材間隔や格子部材断面形状等の条件を変化させた実験により基礎的な検討を行った。

更に、従来の透過型砂防堰堤に対して小規模化を図った土石流フェンスでは土砂の細粒分および水が捕捉出来ず、一部が下流に流出することが予想される(例えば、図4)。ただし、近江神宮内における低平地の

多くは樹木や植生が生育しており、土壌における浸透効果により洪水氾濫範囲の縮小が期待できる。特に、近江神宮では谷出口付近に平坦で未舗装の駐車場が存在しており、自然の土石流分散堆積地としての機能が期待できる。本研究では、筆者らが実験結果等により妥当性を検証してきた解析モデル<sup>3)</sup>を用いて、神宮内に位置する駐車場における地表付近の土中水分状態と土石流の堆積特性との関係について示唆し、通常は駐車場として使用しながら災害時には土石流分散堆積地として利用する新たな史跡保全に配慮した土砂流出防止対策手法に関して検討した。



写真1 谷出口付近に建立されている拝殿

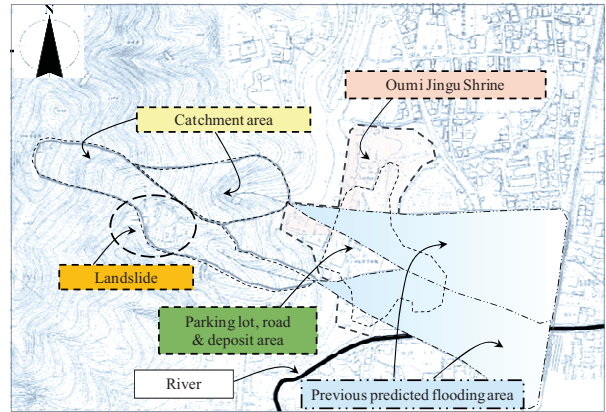


図1 隣接する土石流危険渓流の流域図

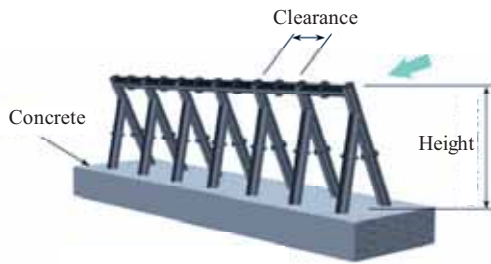


図2 提案する土石流フェンス概要図



図3 従来の透過型砂防堰堤による土砂捕捉事例および提案する土石流フェンスとの比較<sup>4)</sup>に一部加筆

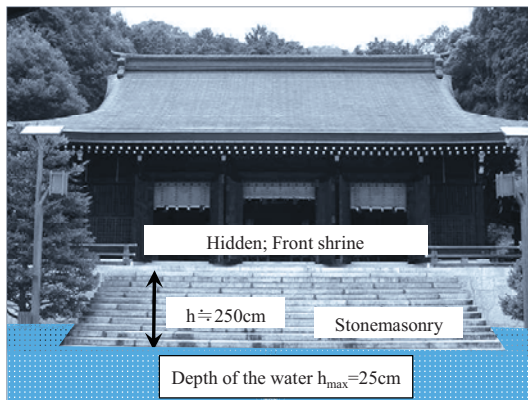


図4 洪水氾濫解析結果に基づく最大浸水予想結果<sup>2)</sup>

## 2. 土石流フェンスの捕捉効果に影響する透過部構造に関する実験

従来の透過型砂防堰堤に対して縮小化を図って提案する土石流フェンスにおいて、渓流に存在する礫径の大きさ等の現地条件にふさわしい構造等について検討し、その規模の更なる合理化および縮小化が望まれる。

透過部における土砂流出制御機能（捕捉効果）に関して、透過部の瞬間閉塞確率を考慮したモデル<sup>5)</sup>、砂防ダムと土石流の特性値を考慮したモデル<sup>6)</sup>、個別要素法を用いて個々の砂礫の挙動を追跡するモデル<sup>7)</sup>および土砂通過を確率的に決定するモデル<sup>8)</sup>が提案されている。また、透過型砂防堰堤における閉塞メカニズムを参考に、鋼製の格子部材を流路底面に配置して土石流を制御する工法<sup>9)</sup>も提案されている。なお、高

橋ら<sup>5)</sup>は格子型砂防えん堤の閉塞メカニズムとして、図5に示すアーチ形成による閉塞モデルを用いて説明している。しかしながら、礫径と格子部材間隔との関係は示されているものの、格子部材断面形状、透過部の傾斜角度について詳細に検討した研究は、筆者らが知る限り存在しない。

そこで、本研究では石礫型土石流を対象に土砂流出調節機能上もっとも有効な透過部構造の基礎的な特徴について把握するため、格子部材間隔、格子部材断面形状ならびに透過部の傾斜角度等をそれぞれ変化させて実験し、その捕捉効果について考察した。

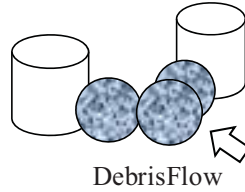


図5 アーチ形成による格子の閉塞現象<sup>5)</sup>

### (1) 実験概要

実験に用いた水路は、図6に示すような水路長 1 m および幅 10 cm の矩形断面を持つ直線水路で、下流端付近に格子型構造物の模型を配置した。また、水路底面には一様砂礫 ( $d=7\text{ mm}$ ) を敷き詰め、上部からの水の供給により石礫型土石流を発生させた。そして、下流に設置した構造物において閉塞した礫の量および通過した礫の量について計測した。なお、捕捉効果に有効な透過部構造を把握するため、図7に示す透過部の形状 (垂直部材、水平部材および格子部材)、格子部材断面形状 (円型部材および角型部材)、格子部材間隔、図8に示す透過部の傾斜角度および格子部材の配置 (土石流側に配置する縦部材と横部材との捕捉効果の違い: 図7) をそれぞれ変化させて捕捉率 (格子型構造物上流側に捕捉された礫の量) を比較した。

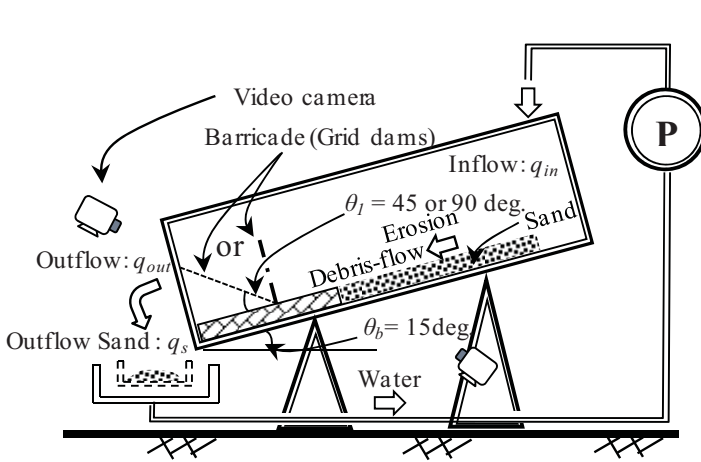


図6 実験装置の概要

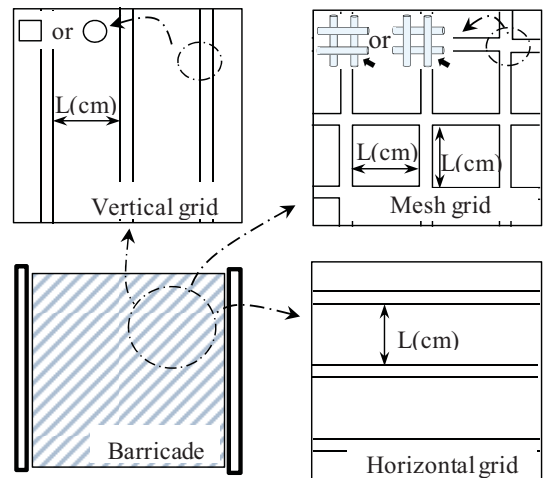


図7 透過部の形状 (鉛直部材、水平部材、格子部材) および部材の断面形状 (円型部材、角型部材) 等の概要

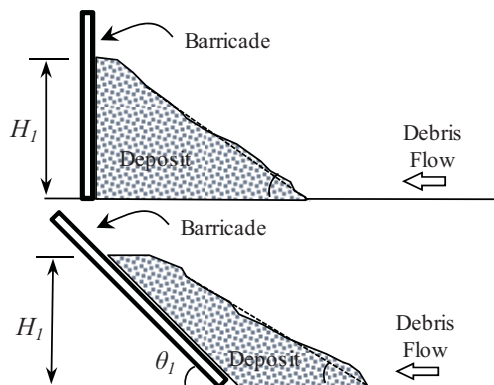


図8 透過部の傾斜設置概要

実験条件について、表1および表2に示す。ここに、 $\theta_l$ は透過部の傾斜角度（図8）、 $L$ は格子部材間隔（\* $d$ は格子部材間隔と礫径との比率）、Dam typeは透過部の形状（図7）、Grill typeは格子部材の断面形状（図7）、Front bar typeは格子部材の配置（格子部材における土石流側に配置された部材：縦あるいは横部材）および $Q$ は上部からの水の供給流量である。なお、供給流量の条件としてはポンプの最大揚水流量、最小揚水流量およびその平均流量の3ケースとし、流量の違いにおける捕捉率の違いに関して比較した。

表1 実験ケース その1

Case	$\theta_l$ (deg)	$L(*d)$	Dam type	Grill type	Front bar type	$Q(\ell/s)$		
1-1	90	1.5	Gr.	□	Ver.	0.72		
1-2				Hor.				
1-3				○				
1-4			Hor.	□				
1-5			Ver.	○				
1-6			Gr.	Ver.				
1-7			Ver.					
1-8			Hor.					
1-9			Ver.	○				
1-10			2.0	Gr.	□		Ver.	
1-11			2.5					
1-12			1.0					
1-13			2.5	Gr.	□		Ver.	0.95
1-14			2.0					0.5
1-15			2.0				Hor.	0.72

Gr. : Mesh grid, Hor. : Horizontal grid, Ver. : Vertical grid    □ : Square, ○: Circle

表2 実験ケース その2

Case	$\theta_l$ (deg)	$L(*d)$	Dam type	Grill type	Front bar type	$Q(\ell/s)$
2-1	45	1.5	Gr.	□	Ver.	0.72
2-2			Ver.			
2-3			Hor.			
2-4		○				
2-5		2.0	Gr.			
2-6		Ver.				
2-7		1.0	Hor.			
2-8	90	1.5	Gr.	□	Ver.	0.95
2-9	90	2.0				
2-10	90	2.0	Gr.			
2-11	45	1.5	Hor.		Ver.	0.50
2-12	90	2.0	Gr.			

実験では、2台のビデオカメラを用いて捕捉状況を録画した。また、捕捉後の状況を把握することを目的に、礫が完全に捕捉されてから3秒後まで給水を続けた。

#### (4) 実験結果

各実験は、発生する土石流のばらつきや流動層中における礫分布の不均一性を考慮して、それぞれの条件に対して3回行った。各実験で得られた捕捉率を、表4に示す。また、透過部の形状や構造等の違いが捕捉率に与える影響を明らかにするため、図9から図14に各ケースの捕捉率を整理して示す。

透過部形状の違いが捕捉率に与える影響に関して、図9に部材を河床に垂直に設置した場合の結果を、図10に部材を斜めに設置した場合の結果を示す。なお、図9に示されるとおり、格子間隔が礫径に対して約1.5倍（1.5 $d$ ）の場合においては、透過部形状（図7）の違いが捕捉率に対してほとんど影響しないことがわかった。一方、格子間隔が2.0 $d$ の場合、水平部材だけでは全く捕捉されず、鉛直部材が土砂の捕捉に大きな役割を果たしていることが明らかになった。

表-4 実験結果 (捕捉率)

Case	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>	Case	1 <sup>st</sup>	2 <sup>nd</sup>	3 <sup>rd</sup>
1-1	96	96	96	2-1	94	94	96
1-2	94	94	96	2-2	80	44	82
1-3	96	96	96	2-3	62	74	58
1-4	82	86	86	2-4	10	70	22
1-5	92	90	90	2-5	90	90	76
1-6	90	90	94	2-6	0	0	0
1-7	90	86	90	2-7	96	95	95
1-8	72	74	82	2-8	6	2	4
1-9	0	0	0	2-9	88	88	88
1-10	24	52	32	2-10	8	38	8
1-11	38	36	42	2-11	76	88	82
1-12	96	96	98	2-12	94	94	94
1-13	62	58	44				
1-14	4	30	16				
1-15	56	54	62				

(%)

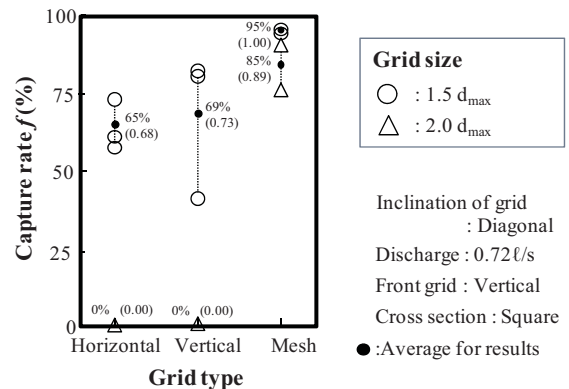
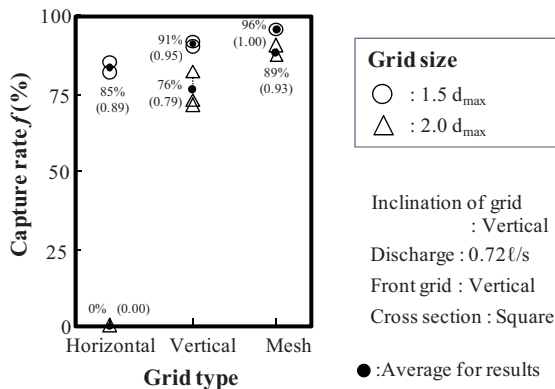


図9 透過部形状の違いによる捕捉率の変化 (垂直設置)

図10 透過部形状の違いによる捕捉率の変化 (傾斜設置)

また、図10に示されるとおり格子部材を河床に対して斜めに設置した場合、垂直に設置した場合に比べて捕捉率が低下した。特に、格子間隔が  $2.0d$  の場合、格子部材以外の形状 (水平部材のみあるいは垂直部材のみの構造: 図7) では全く捕捉されなかった。

透過部における格子間隔の違いと捕捉率との関係について、図11に示す。なお、図11に示されるとおり格子間隔が  $2.0d$  以下の場合、捕捉率は約8割程度以上であった。一方、格子間隔が  $2.5d$  の場合は  $2.0d$  以下の場合に比べて約5割以下の捕捉率であった。

透過部における格子部材の断面形状と捕捉率との関係を、図12に示す。なお、図12に示されるとおり格子間隔が  $1.5d$  の場合、格子部材の違いによる捕捉率の違いが殆ど確認されなかった。しかしながら、格子間隔が  $2.0d$  の場合、丸部材の捕捉率は角部材に比べて約5割以下となった。

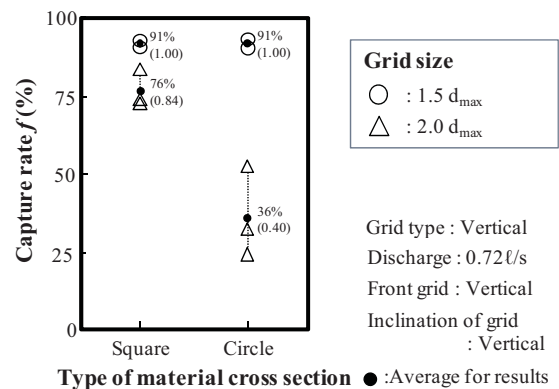
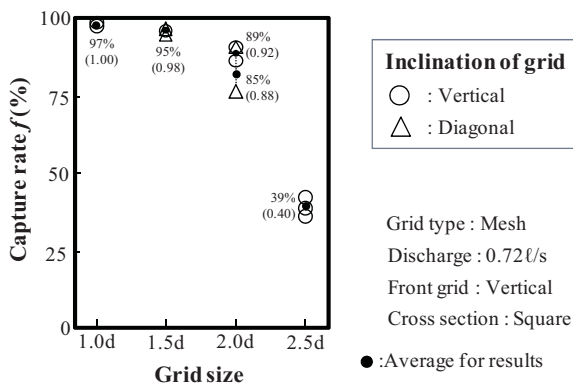


図11 格子間隔の違いによる捕捉率の変化 (格子)

図12 格子部材の断面形状の違いによる捕捉率の変化

次に、上部から供給する水の流量の違いが捕捉率に与える影響に関して、格子形状の場合における流量の違いと捕捉率との関係について図13に示す。図13に示されるとおり格子間隔が $2.0d$ の場合、殆ど流量の違いが捕捉率に影響を与えないことがわかった。なお、流量が増加するに伴い捕捉率が少し減少する傾向を示した。この要因として、捕捉状況の観察結果によると、格子間隔が $2.0d$ において流量がある一定以上の場合にはほぼ捕捉できるが、捕捉後の堆積物が後続流により再侵食を受けることに伴って礫が透過部から下流に一部流出してしまい、結果として捕捉率（捕捉されている礫の割合）が低下した。一方、格子間隔が $2.5d$ の場合は、流量が増加するに伴い捕捉率が大きくなった。この要因として、次の2点が考察される。まず1点目は、流量および水深の増加により単位時間当たりの侵食量の増加により、土石流中の土砂濃度が増えたことに伴い、早期に礫のアーチ形成および閉塞が始まったと推測される。ただし、高橋ら<sup>例え、5)</sup>の河床勾配に応じた平衡土砂濃度が成り立つ場合、同じ河床勾配条件下で土石流中の土砂濃度に違いが生じることは矛盾してしまう。2点目として、流速増加に伴い礫の移動速度が増加し、図5に示される鉛直部材を軸に礫が回転する速度が大きくなることによって、早期に閉塞が始まったと推測される。なお、より詳細な検討は今回の実験装置では困難であるため、今後の課題とする。

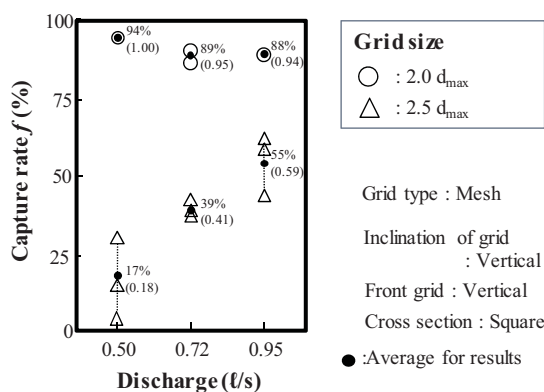


図13 流量の違いによる捕捉率の変化

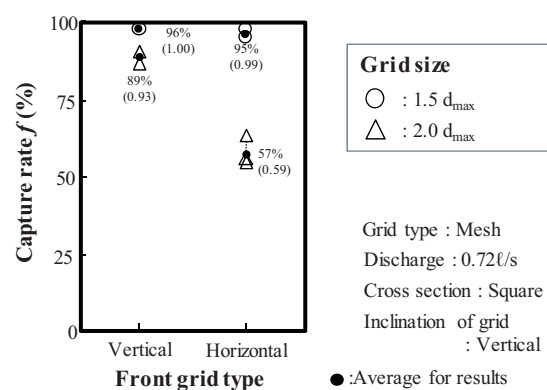


図14 格子部材配置の違いによる捕捉率の変化

最後に、透過部における格子部材配置と捕捉率との関係を図14に示す。なお、図14に示されるとおり格子間隔が $1.5d$ の場合、水平部材と鉛直部材の配置の違いによる捕捉率の違いは殆ど確認されなかった。しかしながら、格子間隔が $2.0d$ の場合、格子部材の内、鉛直部材を土石流側（上流側）に配置した捕捉率は、上流側に水平部材配置した場合に比べて約1.5倍程度の捕捉効果となることが確認された。

以上の結果より、従来の大規模な透過型砂防堰堤に対して小規模化を図った土石流フェンスにおいて効果的に土砂調節を図るためには、角型部材を礫径に対して2.0倍以下の間隔で格子に配置し、河床に対して垂直に設置する構造が有効であると考えられる。その際、鉛直部材を上流側に配置（図8）することが望まれる。なお、本研究は捕捉率において有効な透過部構造に関する基礎的な検討であるため、今後、維持管理も含めた詳細的な構造に関して更なる検討が望まれる。

### 3. 堆積層中の土中水分状態が土石流の堆積特性に与える影響に関する解析

神宮内に位置する未舗装の駐車場を災害時に土石流分散堆積地として利用が可能かどうか検討するために、既往の解析モデル<sup>3)</sup>を用いて土石流が流下する駐車場の地表面付近における土中水分状態と土石流の堆積特性との関係について考察する。

#### (1) 計算に用いる解析モデル

計算に際しては、里深・水山<sup>10)</sup>による溪床堆積物の不飽和浸透過程を考慮した河床変動モデルに一部改良を加えたモデル<sup>3)</sup>を用いる。なお、本予測モデルは不飽和堆積物中における浸透過程とその堆積物上部を流下する洪水や土石流による堆積および侵食過程について同時に計算が可能である。また、堆積物の表面を介

した流動層と堆積層との水移動についても考慮しており、河床表面内外の圧力差と堆積層の透水係数を用いて水移動量を計算している。堆積物中の不飽和浸透流れおよび流動層の解析は、非定常性を考慮するために流れの運動方程式や連続式等を差分して計算している。なお、本研究では土石流が一般的なResume理論<sup>例えば、11)</sup>を参考に、流量に応じて一定の流下幅を形成して流下するものと仮定し、簡単のため鉛直二次元場を対象として解析した。

## (2) 解析条件

既往の溪流調査結果より近江神宮に隣接する溪流から流出すると予測される土石流条件や堆積層の透水性および既往研究<sup>例えば3)</sup>を参考に降雨時を想定した条件を設定し、単位幅流路（延長100m、堆積層厚1.0m）を対象に不飽和浸透過程および土石流の堆積侵食過程について解析した。解析条件としては、土質試験結果により飽和体積含水率 $\theta_s$ を0.4、残留体積含水率 $\theta_r$ を0.1、水分特性曲線の変化点における圧力出納 $\Psi_0$ を-0.05m、飽和透水係数 $K_s$ を0.3cm/sに設定した。また、既往研究<sup>例えば3)</sup>を参考に、比貯留係数 $S_s$ を1.0、係数 $m$ を3とし、 $\Delta x=100\text{cm}$ 、 $\Delta z=20\text{cm}$ 、 $\Delta t=0.001\text{s}$ として計算した。なお、単位幅あたりの最大土石流ピーク流量を $Q_{p, in}=0.50\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ とし、一定流量で堆積地上流部より50秒間供給することとした。また、現地調査結果より溪床勾配を1.0度、河床の粒径を10.0cmおよび内部摩擦角を37度とし、堆積層表面における容積濃度を0.6、谷出口から流出する土石流中の土石流濃度を0.4および堆積物はすべて飽和状態（降雨時を想定）と想定し、マニングの粗度係数を $0.05\text{m}^{-1/3}\text{s}$ として計算している。次に、河床堆積物が透水性の改良等により強雨の間も不飽和状態であると仮定した場合の解析も併せて行った。

## (3) 計算結果

上記の条件のもとで計算された土石流の流動過程に関する解析結果を、図15に示す。なお、下流端における流出量（水および土砂）は $Q_{p, out}=0.47\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ で土砂濃度は上流端において0.4であったものに対して0.05であったことより、土石流分散堆積地の機能として期待できることがわかった。なお、河床堆積物において土壌部の材料の置換え等により透水性を向上させて降雨時においても不飽和状態を確保できる仮定した場合、下流端における流出量は $Q_{p, out}=0.00\text{m}^3/\text{s}$ であった。不飽和状態における土石流の流動過程に関して、流下途中における解析結果を図16に示す。ただし、本解析モデルでは大規模な土石流中の慣性力が考慮されておらず、堆積物中への透水が過大評価されることが懸念される。今後、実験結果等を用いて慣性力の影響に関して精査する必要がある。

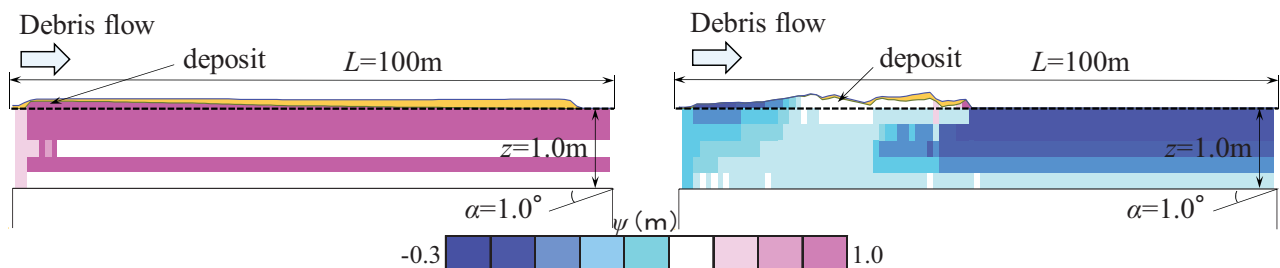


図15 飽和状態(降雨時)における土石流の流動解析結果

図16 不飽和状態(土壌改良)における土石流の流動解析結果

## (4) 今後の具体的方策に関する一考察

解析結果より、通常は駐車場として利用しながら災害時には土石流分散堆積地として利用できる可能性があることが示唆された。また、水と土砂の両成分を浸透および堆積させるためには、土壌部において不飽和な土中水分状態を確保する必要があることがわかった。ただし、一般的な土壌部において強雨時に不飽和な土中水分状態を確保することは困難である。そこで、完全に水までを土壌部において浸透堆積させるために、既往で提案されている鋼製透過部材（スリット部材）を河床部に配置した土石流ブレーカー<sup>9)</sup>および排水施設等の併用による対策が望まれる。

## 4. おわりに

史跡の景観に配慮した新たな土砂流出防止対策として、谷出口付近に設置する従来の透過型砂防堰堤と比較して小規模化を図った土石流フェンスによる大径礫の捕捉と、捕捉できなかった土砂の細粒分を対象に下流に位置する駐車場を土石流分散堆積地として利用する複合的な組合せによる対策手法に関して検討した。なお、本研究では土砂流出機能上においてもっとも有効であると思われる基礎的な透過部構造について把握するとともに、未舗装の駐車場における土中水分状態と土石流の堆積特性に関して解析モデルを用いて検討し、今後における土地利用の高機能化に関して示唆した。

本研究により得られた成果を、以降に要約する。

- 1) 格子形状と捕捉効果との関係に関して、格子間隔が広い場合、水平部材だけで全く捕捉できず鉛直部材が土砂捕捉に大きな役割を果たしていることが明らかになった。
- 2) 格子間隔と捕捉効果との関係に関して、期待する捕捉効果に必要な格子間隔としては、大径礫の礫径の2倍程度 ( $2.0D$ ) までであることがわかった。
- 3) 格子部材の断面形状と捕捉効果との関係に関して、丸部材は角部材に比べて約50%程度の捕捉率であることがわかった。
- 4) 透過部の設置角度と捕捉効果との関係に関して、格子形状の場合、河床に対して垂直に設置した捕捉率と斜めに設置した捕捉率とにおいて殆ど違いが存在しないことがわかった。
- 5) 格子部材の土石流側における配置の違いと捕捉効果との関係に関して、土石流側に縦部材を配置すると横部材を配置した場合に比べて約1.5倍の捕捉効果であることがわかった。
- 6) 神宮内に位置する駐車場を、災害に土石流分散堆積地として利用することが可能であることが示唆された。

## 参考文献

- 1) 公益社団法人 地盤工学会他：平成23年台風12号による紀伊半島における地盤災害調査 報告書，2011.
- 2) 原田紹臣・里深好文：史跡の保全に配慮した土砂災害対策，歴史都市防災論文集，Vol. 6, pp.133-140, 2012.
- 3) 原田紹臣・里深好文：堆積物中の不飽和浸透過程を考慮した侵食に関する研究，河川技術論文集，Vol.18, pp.287-291, 2012.
- 4) 国土交通省砂防部 Web site, <http://www.mlit.go.jp/mizukokudo/sabo/index.html>, 2013.
- 5) 高橋保・中川一・里深好文・王浩民：格子型砂防ダムの閉塞モデル，水工学論文集，Vol. 45, pp.697-702, 2001.
- 6) 水山高久・小橋澄治・水野秀明：格子型ダムのピーク流砂量減率に関する研究，新砂防，Vol.47, No.5, pp.8-13, 1995.
- 7) 水野秀明・小橋澄治・南哲行・倉岡千朗：個別要素法を用いた鋼管製透過性砂防ダムの土石流捕捉効果に関するシミュレーション解析，砂防学会誌，Vol.52, No.6, pp. 4-11, 2000.
- 8) 芦田和男・江頭進治・栗田三津夫・荒牧浩：透過性砂防ダムの土石流調節機構，京都大学防災研究所年報，Vol.30, B-2, pp.441-456, 1987.
- 9) 矢澤昭夫・水山高久・森田昭宏：土石流ブレイカー（底面水抜きスクリーン）に関する実験的研究，土木研究所資料，Vol.2374, 1986.
- 10) 里深好文・水山高久：溪床堆積物の不飽和浸透過程を考慮した石礫型土石流の発生・発達過程に関する数値計算，水工学論文集，No.53, pp.697-702, 2009.
- 11) 原田紹臣・里深好文：活発な土砂生産・土砂流出を考慮した洪水予測技術に関する研究，河川技術論文集，Vol.19, pp.217-222, 2013.