

## 深層崩壊に起因する土砂災害に対するハード対策の検討

(株)建設技術研究所 柳崎 剛  
(株)建設技術研究所 福島 和彦  
(株)建設技術研究所 岸上 直之  
(株)建設技術研究所 和田 孝志  
(株)建設技術研究所 速見 智

### 論文要旨

深層崩壊に起因する土砂災害は、平成23年台風12号により紀伊半島で発生した事例に代表されるように近年、各地で発生し、通常の土砂災害に比べて甚大な被害が発生している場合がある。深層崩壊起因の土砂災害の中でも、天然ダムを形成した降雨中に決壊する短期決壊型天然ダムタイプと土石流タイプは緊急対応が困難の上、影響範囲が広く、事前のハード対策により被害を減ずることが重要となる。

本論文ではA川流域を対象に、蓋然性の高い斜面から下流域を対象に構築した数値解析モデルにより被害軽減効果がある整備メニューを抽出し、既定計画の施設配置についても考慮した上で、深層崩壊対策施設に関する配置計画を取りまとめ、今後の事業化に向けての課題を整理する。

キーワード：蓋然性の高い深層崩壊、深層崩壊起因土石流、天然ダム決壊、事前ハード対策、既往施設の活用

### まえがき

深層崩壊の発生頻度は低いものの、崩壊規模が大きいいため、従来の砂防施設単独のみでは対応できない。このため、ハード対策とソフト対策を含めた複合的な対策が求められている。深層崩壊に起因して発生する土石流の流下形態は3つに分類され、天然ダムタイプ、土石流流下タイプ、崩土直撃タイプがある。本論文では影響範囲の大きい天然ダムタイプと土石流タイプを対象とする。また、天然ダムタイプは決壊にいたるまでの継続時間によって「短期決壊型」と「長期継続型」<sup>1)</sup>の2つのタイプに分類される。深層崩壊を発生させた降雨期間中に決壊する「短期決壊型」は、天然ダムが形成され決壊に至るまでの間に緊急的な対応が困難であるため、事前にハード対策を施し被害を減ずることが重要となる。

本論文では、深層崩壊の相対的な危険度が高いA川流域(図-3参照)において、短期決壊型天然ダムの決壊や土石流の流下に伴う被害軽減を図ることを目的とする。天然ダム決壊タイプの主な検討項目は、天然ダム決壊タイプの分類、決壊時洪水流量と下流の洪水流量との合流を考慮した被害想定、天然ダム上下流での複合的な被害軽減対策であり、土石流タイプの主な検討項目は土石流の流下に伴う被害想定とその対策である。

### 1. 深層崩壊起因の土砂災害のハード対策

#### (1) 天然ダムタイプのハード対策

天然ダムタイプに対する事前ハード対策施設より、以下の2種類の施設を基本に被害軽減を図ることとする<sup>1)</sup>。  
・深層崩壊が生じた場合に天然ダムの高さを減ずる施設【土砂捕捉のための砂防堰堤(鋼製透過型、透過型)】  
・天然ダム決壊により土石流・洪水流が生じた場合に土砂・泥水の流出を制御する施設【せき上げを生じさせる透過型堰堤(コンクリートスリット型)】

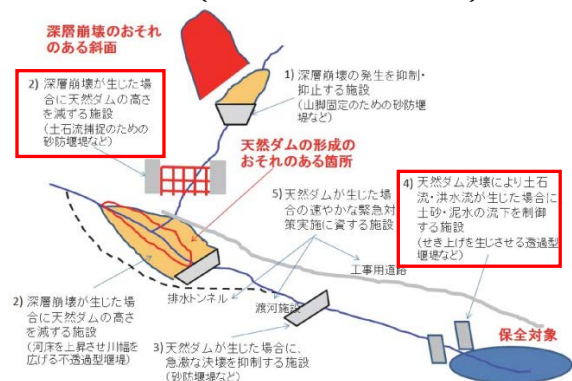


図-1 天然ダムタイプのハード対策イメージ<sup>1)</sup>

#### (2) 土石流タイプのハード対策

土石流タイプに対する事前ハード対策施設より、以下の2種類の施設を基本に被害軽減を図ることとする<sup>1)</sup>。  
・深層崩壊が生じた場合に土石流の規模を減ずる施設【河床勾配を緩くする不透過型砂防堰堤】  
・深層崩壊が生じた場合に土石流を捕捉する施設【土石流を捕捉する透過型堰堤(鋼製透過型)】

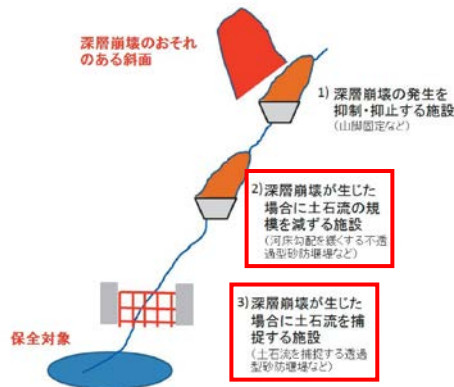


図 - 2 土石流タイプのハード対策イメージ<sup>1)</sup>

## 2. 深層崩壊のおそれがある地域と崩壊土砂量

### (1) 深層崩壊のおそれがある地域の設定

A川の砂防事業区域は、流域面積約136km<sup>2</sup>、最大流路長約33kmであり、砂防基準点上流はA川本川流域(約58km<sup>2</sup>)とB川流域(約78km<sup>2</sup>)に二分される。地質は和泉層群を主に、中央構造線より北側の領家帯と南側の三波川帯に区分される。

深層崩壊実績としては、B川支流C川の中流部において、約230年前の豪雨により大崩壊(崩壊土量約200万m<sup>3</sup>)が発生し、崩壊土砂が人家を押し潰した後、C川を堰止め天然ダムを形成した<sup>2)</sup>ことが記録されている。既往検討<sup>3)</sup>において、地質特性、地形特性、気候特性の等質性と深層崩壊跡地の分布状況を考慮した上で、蓋然性の高い深層崩壊現象の発生領域として5箇所が抽出されている(図3のa~e)。

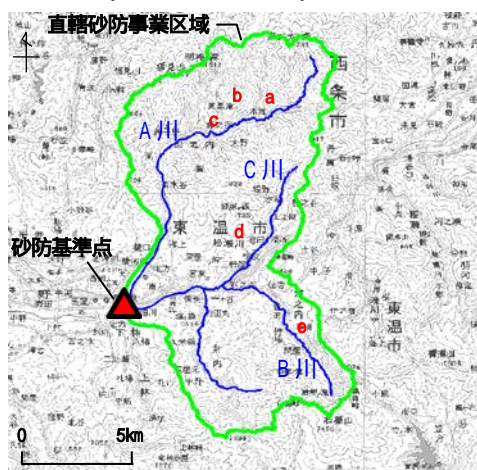


図 - 3 検討対象位置図

本論文では、蓋然性の高い深層崩壊現象の発生領域5箇所のうち、深層崩壊実績があり、土石流及び天然ダムによる複合的な災害が想定されるC川(図3のd)及び本川のA川(図3のc)を例として、深層崩壊に起因する土砂移動現象の計算結果、既往施設及び計画施設の効

果の評価結果を報告する。

### (2) 崩壊土砂量の設定

C川における深層崩壊に伴う土砂量は、蓋然性の高い深層崩壊現象として整理<sup>3)</sup>された標準規模561千m<sup>3</sup>、最大規模1,470千m<sup>3</sup>を採用する。同様にA川では標準規模211千m<sup>3</sup>、最大規模331千m<sup>3</sup>を採用する。

深層崩壊対策技術に関する基本的事項では、「深層崩壊に関するハード対策は河川砂防技術基準における砂防基本計画における深層崩壊・天然ダム等異常土砂対策として実施する<sup>1)</sup>とある。このため、対象流域における砂防基本計画の計画土砂量と上記の深層崩壊土砂量を比較し、取りまとめた結果を以下に示す。

- ・A川本川においては、単独崩壊の標準規模および最大規模土砂量ともに基準地点の生産土砂量の計画値内でおさまる。
- ・C川の最大規模の深層崩壊土砂量では、計画基準点における計画生産土砂量を上回るため、計画値に最大規模の深層崩壊土砂量を含める場合は基本計画土砂量の見直しが必要である。
- ・深層崩壊規模によってはA川流域における基本計画土砂量の内数となるため、深層崩壊対策による効果を事業の便益として説明できる可能性があることを確認した。

## 3. 深層崩壊に伴う土砂移動現象の検討

### (1) 検討方法

深層崩壊に起因する天然ダムの被害予測には、深層崩壊土砂の土石流の発生過程、土石流の流下堆積過程、天然ダムの越流決壊過程、天然ダム決壊による土石流・洪水の流下過程、下流域での氾濫・堆積過程の5つのプロセス(図4参照)を考慮する必要がある。土石流の被害予測では、深層崩壊土砂の土石流の発生過程、土石流の流下堆積過程、下流域での氾濫・堆積過程3つのプロセスとなる。検討では土砂輸送形態の変化に合わせて上記の計算過程を統合して用い、事前対策施設の効果検証を実施している。

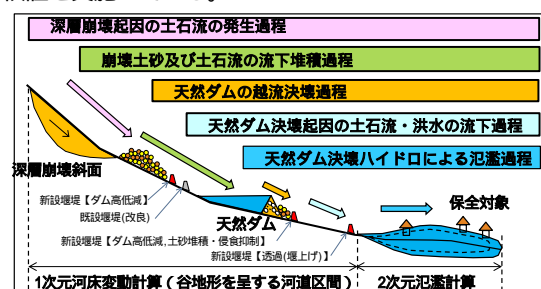


図 - 4 天然ダムタイプの土砂移動プロセス

(2) 深層崩壊に起因する土石流の計算(天然ダムタイプ、土石流タイプ)

深層崩壊規模に起因する土石流の流下・氾濫現象を追跡した上で、土石流による河道閉塞に伴い形成する天然ダムの形状を推定する。土石流の流下計算には、「深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案)<sup>4)</sup>」に準じて、土石流の間隙流体に細粒土砂が取り込まれることによる流体層密度の時間的变化(密度変化の式は以下を参照)を考慮した1次元河床変動計算を採用し、深層崩壊直下より天然ダム形成箇所や氾濫開始地点までの通過土砂量を算定する。

$$C_d = (1 - w_d)(1 - P(D_c)) \quad (1)$$

$$r_d = \frac{w_d r_w + (1 - w_d) r_s P(D_c)}{w_d + (1 - w_d) P(D_c)} \quad (2)$$

ここで、 $C_d$ : 土石流中の層流状態で骨格を形成する土石の濃度(土砂濃度)、 $w_d$ : 土石流中の清水の割合、 $P(D_c)$ : 全土石に占める粒径が  $D_c$  以下の土石の割合、 $\rho_d$ : 土石の密度、 $\rho_s$ : 清水の密度である。粗粒分と細粒分の境界の粒径である  $D_c$  は既往河床材料調査をもとに2mmに設定する。

(3) 天然ダム形状の決定(天然ダムタイプ)

既往実績より深層崩壊起因の天然ダムの約90%は河床勾配が1/10(約6°)より緩い区間で形成することがわかっている<sup>5)</sup>。そこで、本検討では深層崩壊起因の土石流が河床勾配1/10地点まで流下して、土石流の土砂量の全量が天然ダムを形成すると仮定する。

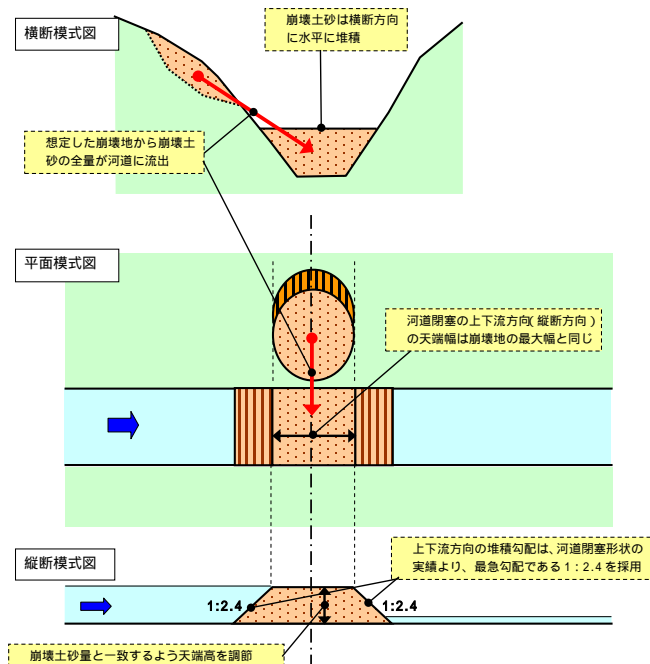


図 - 5 天然ダム設定方法のイメージ

崩壊土砂は溪流の横断方向に対して水平に堆積し、河道閉塞の上下流方向の天端幅は閉塞地点に流入する支流の流路幅と同程度とする。上下流方向の堆積勾配は既往事例を参考に最急勾配である25°(1:2.4)を採用し、天然ダム高は河床勾配1/10地点を通過した土砂量と一致するように形状を調整する。上記の内容を整理したイメージ図を図-5に示す。

C川の天然ダム形成箇所である1/10地点の位置を図-8に示している。

(4) 天然ダム湛水規模の検討と決壊タイプの分類(天然ダムタイプ)

(3)で設定した天然ダム位置と高さをもとに天然ダム上流の湛水容量を算定し、天然ダム地点への流入ハイドロは基本計画で対象とする計画ハイドロを面積按分したハイドロを設定する。天然ダムは洪水ピーク流量発生時刻に形成し流入量が湛水容量より大きくなると決壊したとみなし、天然ダムの決壊タイプを分類する。天然ダムの決壊タイプは、発災後の初動対応の目安である48時間以内に決壊する場合を短期決壊型とし、48時間を超えて決壊するものを長期継続型と分類する。

C川d領域における標準規模、最大規模それぞれの土砂量に応じた天然ダム決壊タイプの分類結果を表-1に、天然ダムの決壊を判定したグラフを図-6に示す。最大規模は決壊まで48時間以上の時間的猶予があるのに対し、標準規模は天然ダム形成後5時間で決壊する。発災後の応急対応が難しいため、短期決壊型は事前のハード対策により被害を軽減する必要がある。

表 - 1 天然ダム決壊タイプの分類

規模	ダム高 (m)	湛水容量 (千 m <sup>3</sup> )	継続時間 (時間)	決壊タイプ
標準	22.7	901	5	短期決壊型
最大	40.6	2,858	-	長期継続型

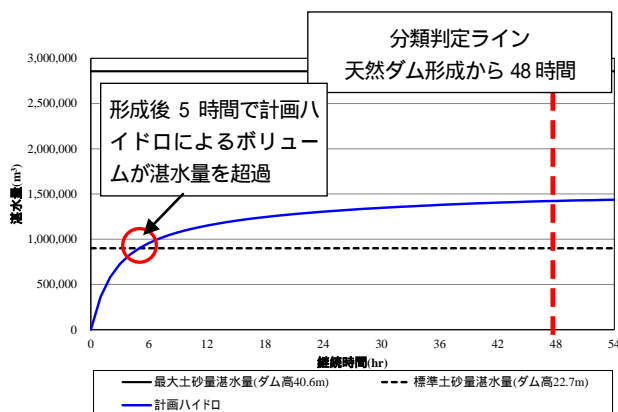


図 - 6 天然ダム決壊判定図

(5)天然ダム下流残流域からの合流を考慮した被害想定  
(天然ダムタイプ)

後述する施設効果を評価するため、統合的な土石流シミュレーターである HyperKANAKO を使用し、深層崩壊起因の土石流の2次元氾濫解析、天然ダムの越流決壊解析(1次元)及び下流河道における2次元氾濫解析を実施する。天然ダムの越流決壊解析の対象区間は、各施設の効果を評価するためB川合流点までとし、合流点を2次元氾濫解析の開始点とした。2次元氾濫解析に用いる洪水ハイドログラフは天然ダム形成箇所(A=10.0km<sup>2</sup>)に対し、合流するB川流域(A=21.9km<sup>2</sup>)の流域面積が大きいいため、基本計画で使用する計画ハイドログラフを面積按分した洪水流量を天然ダム決壊ハイドログラフに加えて算定する。上記の内容を整理した設定イメージ図を図-7に示す

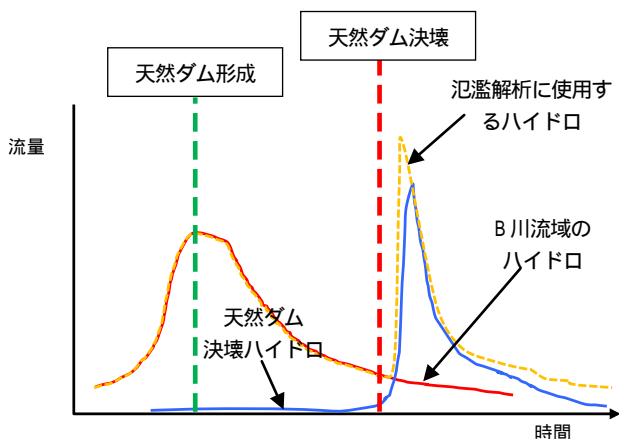


図-7 氾濫解析地点のハイドログラフ設定イメージ図

4. 施設による効果の評価

(1) 施設配置計画

C川 d 領域における既往施設及び砂防基本計画上の計画施設の配置状況を図-8、各計画施設の諸元を表-2に示す。図中の既設砂防堰堤(堤高H=10.0m、不透過型)は、砂防基本計画上では部分透過型への改良が計画されている。

表-2 計画施設の諸元(C川)

配置施設	設置位置	機能	堤高(m)
鋼製スリット型	渓流谷出口	土石流の捕捉	9.5
既設堰堤(改良)	天然ダム下流	洪水流の制御	10.0
コンクリートスリット型	天然ダム下流	洪水流の制御	10.0
コンクリートスリット型	天然ダム下流	洪水流の制御	10.0
コンクリートスリット型	天然ダム下流	洪水流の制御	10.0

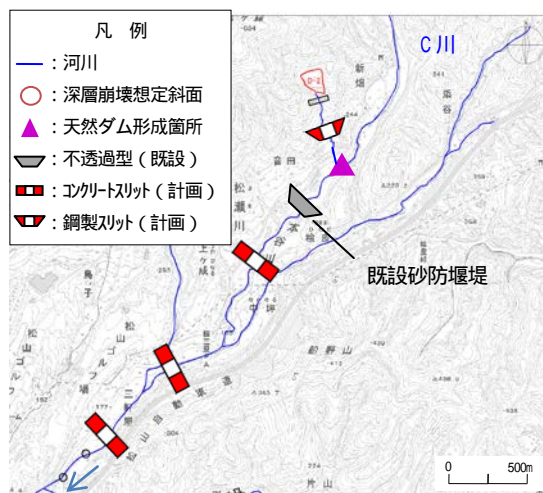


図-8 C川 d 領域から下流の施設配置図

同様にA川 c 領域における既往施設、砂防基本計画上の計画施設及び基本計画から追加・変更した計画施設の配置状況を図-9、各計画施設の諸元を表-3に示す。

表-3 計画施設の諸元(A川)

配置施設	設置位置	機能	堤高(m)
鋼製スリット型(基本計画諸元)	渓流谷出口	土石流の捕捉	9.5
鋼製スリット型(ハイダム案、基本計画諸元から変更)	渓流谷出口	土石流の捕捉	22.0
不透過型(基本計画から追加)	流下区間	土石流の低減	15.0

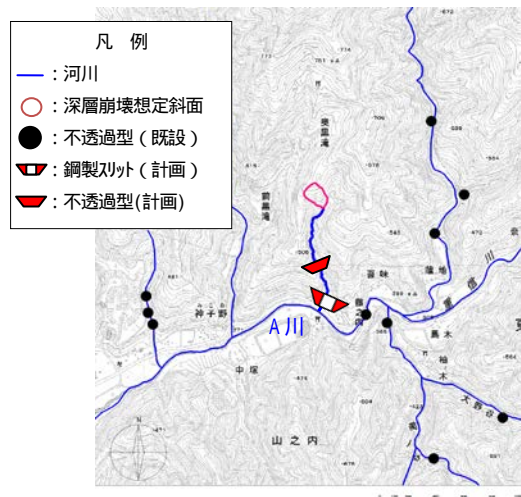


図-9 A川 c 領域から下流の施設配置図

(2) 天然ダムタイプの施設効果の検討

表-1に示した短期決壊型の天然ダムに対し、施設配置の検討ケースは、case1:無施設、case2:現行施設、case3:計画施設の3ケースとする。各ケースの天然ダム決壊時の氾濫流量ハイドログラフを図-10に、土石流氾濫及び天然ダムの湛水、決壊に伴い想定される複合的な被害の

状況を表-4に示す。図-11、図-12には被害が最大となるcase1の被害想定区域図を示す。図-12にはcase3の施設整備により被害が軽減される区域も示す。

氾濫ピーク流量は、case1の $2,930\text{m}^3/\text{s}$ に対しcase2で約10%、case3で約20%抑制される。一方、case3は、天然ダム上流の施設効果により湛水容量が縮小し、ピーク到達時間は早まる傾向にある。

深層崩壊直下の渓流谷出口に配置する鋼製スリット型堰堤は天然ダム高を1m程度低減させるが、湛水による被害戸数の軽減効果はない。天然ダム下流における既設堰堤の改良及びコンクリートスリット型堰堤3基の一体的な整備により天然ダムの決壊流量を抑制し、被害戸数は55%程度まで減少する。被害をさらに軽減するためには、河川沿いの道路や集落の状況を踏まえて、追加整備を検討する必要がある。

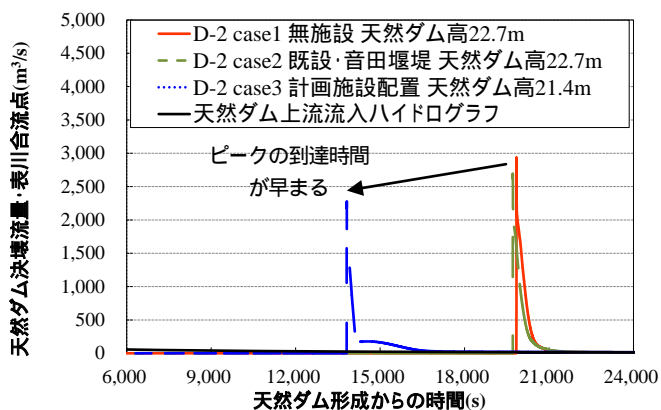


図-10 天然ダム決壊時の氾濫流量

表-4 対策施設案と被害低減効果

項目	case1	case2	case3
土石流総流出土砂量(千 $\text{m}^3$ )	491	491	453
土石流被害戸数(戸)	0	0	0
天然ダム高(m)	22.7	22.7	21.4
天然ダム湛水容量(千 $\text{m}^3$ )	901	901	791
湛水被害戸数(戸)	1	1	1
決壊氾濫ピーク流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2,930	2,690	2,280
ピーク到達時間(sec)	19,843	19,713	13,815
決壊氾濫被害戸数(戸)	289	265	162

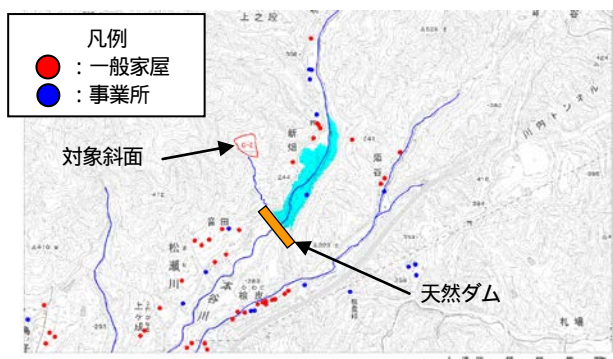


図-11 天然ダムによる湛水区域図(case1)

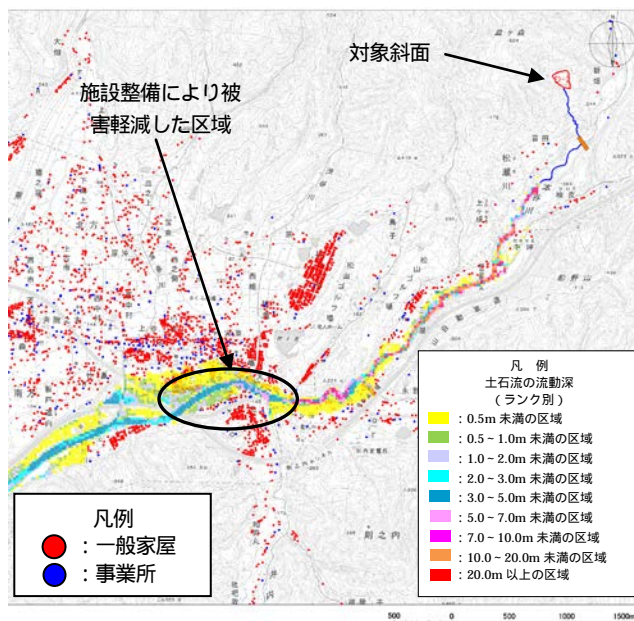


図-12 天然ダム決壊による最大流動深図(case1)

ここで計画施設の条件下で、深層崩壊規模と被害軽減効果の関係性に着目し、崩壊土砂量(50%値、25%値、12.5%値)と流出土砂量、天然ダム高を表-5に整理した。標準規模 $561\text{千}\text{m}^3$ の25%値、12.5%値に対し、天然ダム高は6.8m、2.6mまで抑制されるため、計画施設の被害軽減効果はより確実に発揮される。このことは、砂防基本計画上、ある程度の崩壊規模であれば深層崩壊対策としての被害軽減効果を便益として考慮できることを示唆している。

表-5 崩壊規模と総流出土砂量、天然ダム高

項目	50%値	25%値	12.5%値
総流出土砂量(千 $\text{m}^3$ )	210	100	40
天然ダム高(m)	12.3	6.8	2.6

### (3) 土石流タイプ

標準規模の土砂量( $211\text{千}\text{m}^3$ )に対し、施設配置の検討ケースは、case1:無施設、case2:基本計画施設、case3:基本計画施設諸元変更案+不透過型堰堤配置の3ケースとする。各ケースの土石流ハイドログラフを図-13に、被害の状況を表-6に示す。図-14には被害が最大となるcase1の被害想定区域図を示す。図-14には、case3の施設整備により被害が軽減される家屋も合わせて示す。

土石流のピーク流量は、case1の $5,863\text{m}^3/\text{s}$ に対し、case2で約5%、case3で約97%抑制される。土石流の総流出量については、case1の $96.6\text{千}\text{m}^3$ に対し、case2で約2%、case3で約77%抑制される。被害戸数については

case3 まで施設を整備すると無被害となる。

この結果から、深層崩壊起因の土石流の被害を抑制するためには、基本計画施設の整備では効果が小さく、施設諸元を見直す必要があることを確認した。

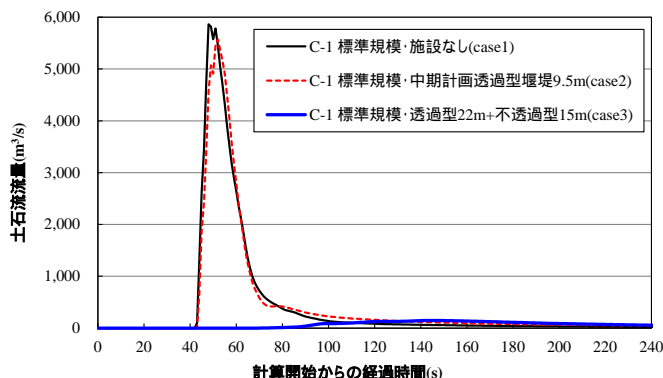


図 - 1 3 土石流のハイドログラフ

表 - 6 対策施設案と被害低減効果

項目	case1	case2	case3
土石流総流出土砂量 (千 m³)	96.6	94.9	22.5
土石流被害戸数 (戸)	1	1	0
ピーク流量 (m³/s)	5,863	5,572	149

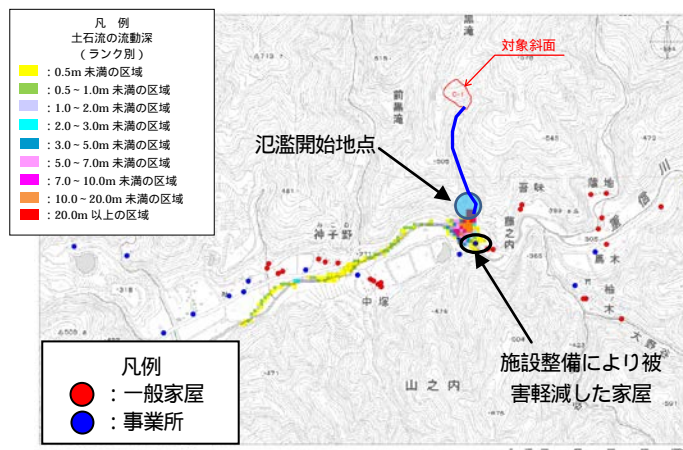


図 - 1 4 土石流の氾濫による最大流動深図(case1)

### 5. まとめ

本検討から得られた知見や今後の課題をとりまとめ、以下に整理する。

- ・深層崩壊に伴う土石流の流下から天然ダムの形成、決壊までを解析できるモデルを構築し、既往施設や計画施設による効果を定量的に評価した。

- ・本論文で対象とした天然ダムタイプおよび土石流タイプの被害想定に対し、計画にもとづく新規施設設置や既存施設改築による被害軽減は十分でないケースがあり、この場合、諸元の見直しや追加の施設配置などを一体的に整備することやソフト対策との組み合わせを検討する必要がある。
- ・天然ダム上流区間における施設整備では、計画規模を超過する土石流外力に対し、安定性を確保する断面形状について、補強方法等も踏まえて詳細に検討する必要がある。
- ・深層崩壊起因の土石流や天然ダムに伴う被害を無被害になる程度まで低減させることは困難であるが、どの程度の規模であれば効果を発揮するかを把握する目的で深層崩壊土砂量と流出土砂量の関係性について、C川 d 領域を対象に検討を行った。その結果、標準規模の 25% 値、12.5% 値のケースでは、天然ダム高が抑制されるため、計画施設の被害軽減効果は確実に発揮される。
- ・砂防基本計画との整合を確認することを目的に、深層崩壊による土砂量を、砂防基本計画の基本土砂量と比較した。その結果、単独崩壊の標準規模土砂量であれば基本計画の崩壊生産土砂量を超過しないため、深層崩壊対策を事業の便益として説明できる可能性があることを確認した。最大規模の土砂量を対象とすると基本計画の土砂量を超過するケースもあり、この場合は基本計画を見直し、対象とする土砂量を設定する必要がある。

### あ と が き

本論文の執筆に際し、ご指導・ご助言いただいた関係者の方々に謝意を表します。

### 参考文献(または引用文献)

- 1) 蒲原潤一、内田太郎：深層崩壊対策技術に関する基本的事項、国総研資料第 807 号、H26.9
- 2) 国土交通省 四国地方整備局 四国山地砂防事務所：四国山地の土砂災害、H16
- 3) 林孝標、高川智、岡田浩孝、桜井亘、内田太郎、池田誠、横尾公博、大塚智久、長塚結花(2016)：深層崩壊に起因する被害想定手法について、平成 28 年度砂防学会研究発表会概要集、H28.5
- 4) 石塚忠範、山越隆雄、内田太郎、西口幸希：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案)、土木研究所資料第 4240 号、H24.9
- 5) 国土交通省 砂防計画課、国土技術政策総合研究所土砂災害研究部：深層崩壊に起因する土砂災害被害想定手法(素案)〈試行的検討用〉、H27.6