土砂生産・土砂供給過程を考慮した斜面崩壊に基づく河道供給土砂量の算定

SEDIMENT SUPPLY TO RIVER CHANNELS FROM SLOPE FAILURES CONSIDERING SEDIMENT PRODUCTION AND DELIVERY PROCESSES

大寺 礼子[1]・武藤裕則[2]・西山賢一[3]
Reiko OTERA, Yasunori MUTO, Kenichi NISHIYAMA

[1] 徳島大学大学院創成科学研究科（〒770-0814 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地）
E-mail: c612441004@tokushima-u.ac.jp
[2] 徳島大学大学院社会産業理工学研究部（〒770-0814 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地）
E-mail: muto_yas@tokushima-u.ac.jp
[3] 徳島大学大学院社会産業理工学研究部（〒770-0814 徳島市南常三島町 2 丁目 1 番地）

Key Words: *slope failure, sediment production, sediment delivery process, long-term prediction*

1 はじめに

河道を形成している土砂の主な供給源は，流域の山体を構成する岩盤であるが，岩盤が河床材料となるまでの過程は，風化した岩盤とその上に積もった落ち葉や枝からなる土層（以下，崩壊土層という）が「斜面から崩壊：土砂生産」した後，「河道内へ到達：土砂供給過程」する 2 つに分けられる．

既往研究では，山野井ら[1)]が上記の 2 過程に，河道内の土砂輸送堆積過程を加えた 3 過程として，土砂生産モデルを構築している．

また，ダムへの過剰な土砂堆積が問題視されている那賀川の長安口ダムを対象に，笠井ら[2)]がダム堆砂量の再現を実施している．長期間にわたって実施された現地の崩壊土層の調査結果や，裸地分布状況・ダム堆砂量などの大量の観測資料をもとに土砂生産モデルを構築している．

このように，土砂管理に関する諸問題の解決のため，土砂動態を再現・予測する研究が進められているが，中小河川を対象とする場合，検討に必要なデータが少ない他，複雑で負荷の高い調査・検討に対する費用が確保できず，現時点で活用可能な計算モデルは少ない．

以上のような背景を踏まえ，本研究は長期的な中小河川の河道計画（維持管理）に適用可能な，検討負荷の小さい河道供給土砂量算出モデルの構築を目指すものである．

2 検討対象区域とその特性

福井川は、**図-1** に示すとおり徳島県阿南市に位置する，流域面積 33.7km^2 の二級河川である．中流部の福井ダム（平成 7 年完成）に関する資料が，構築するモデルの検証に利用できることから，当ダムの集水域 15km^2 を検討対象区域とした．



図-1 福井川流域の概況

図-2 に徳島県東部の四万十帯の地質図[3)]と福井ダム位置を示す．対象区域は四万十北帯に位置し，プレート沈み込みに伴う付加体で構成されており，砂岩・泥岩・チャートなどからなる．四国内の三波川

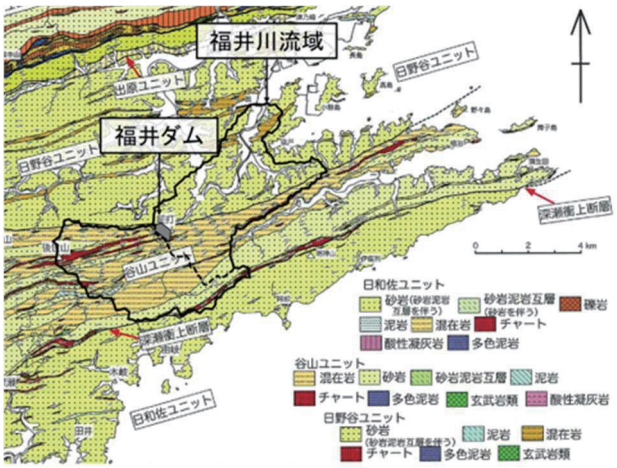


図-2 四万十北帯の地質図[3]と福井ダム位置図

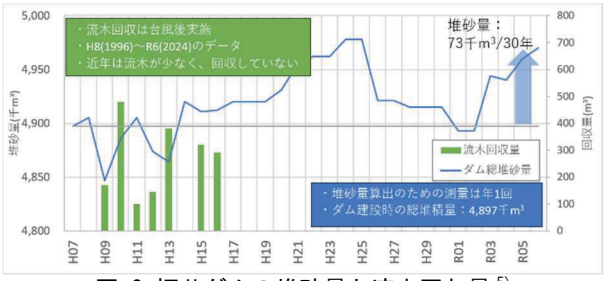


図-3 福井ダムの堆砂量と流木回収量[5]

帯や秩父帯と比較すると大規模な地すべり地形が少ない特徴があり[4]，土砂生産の供給源としては，比較的規模の小さな表層崩壊が主体と考えられる．

河道内への土砂流入量が観測されているダムと，土砂供給源である斜面が近く，表層崩壊以外の大規模崩壊が少ないと想定される当該区域を対象とすることで，冒頭に記載の 2 過程のモデル化とその検証が実施できると捉える．

(1) 福井ダムの堆砂量の実態

図-3 に福井ダムの平成 7 年～令和 6 年までの 30 年間の堆砂量と流木回収量[5]を示す．平成 21 年～25 年には他の期間に比べ堆積が進んでいる．流木回収は流木発生数が小さいことから，平成 16 年までの実施にとどまっている．

(2) 土砂災害発生状況と標高の変化

平成 17 年～令和 6 年の 20 年間で，徳島県により記録された対象区域で発生した土砂災害[6]は，3 回の降雨によって 4 箇所（**図-4**）である．

また対象区域では，平成 22 年及び令和 2 年に航空レーザ測量が実施されている．5mDEM を用いて標高の変化を整理した結果を，土砂災害発生箇所と合わせて**図-4** にカラーチャートで示す．

(3) 現地の状況

土砂災害発生箇所及び標高の低下がまとまって確認される区域を対象に，航空写真や現地踏査により状況を調べた．その結果を以下に列挙する．

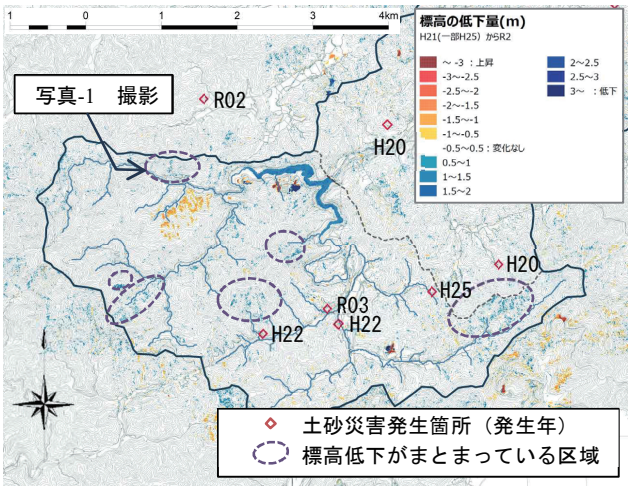


図-4 土砂災害発生箇所と標高変化箇所[6),7)]



写真-1 レーザ測量で標高低下が認められる斜面

- 土砂災害発生箇所はいずれも，人家や耕作地に隣接している箇所であり，規模も小さく航空写真や現地で崩壊の状況確認はできなかった．
- レーザ測量で 0.5m 以上の標高の低下がまとまって確認された箇所では，航空写真及び現地のいずれにおいても，裸地状になっているなどの大きな崩壊は確認できなかった．一方で，**写真-1** に示すように，表層の落ち葉等がなく土砂がむき出しになっている，根曲がりした樹木が見られるなど，土砂が動いている状況が確認できた．
- 航空写真では確認できない小規模な流路においても，土砂移動が発生している状況が明らかな渓流がいくつか見られた．
- 林道沿いの岩盤露頭箇所では，崩壊土層の厚さは約 1.0m 程度であった．

3 斜面崩壊土量の算定条件と手法 ～土砂生産過程の設定～

(1) 斜面崩壊土量算定における既往研究

松四[8]は，近年の豪雨によって土砂災害が多発している場を対象とし，任意の降雨入力に対して，斜面からの土砂の生産量を算定するモデルを構築して

いる．崩壊土層に加わる水理・力学的な性質に，森林の根系による土層補強効果のモデルを加え，表層崩壊及び土石流の発生場を予想可能にした．さらに，崩壊による土層の除去と風化等による回復過程モデルを取り入れることで，崩壊免疫性の効果を評価可能にし，ランダムに連続して襲来する降雨イベントごとに，高精度で斜面崩壊土量を予測することを可能にしている．

しかし，当モデルの構築には，モデルパラメータ設定に関して，崩壊土層の物性のデータ取得や立木の胸高直径と分布などの調査が必要となり，調査費用の確保が困難である中小河川では実施が難しい．

また，本研究の対象区域では，上記モデルが対象としている樹木を巻き込むような表層崩壊や土石流は確認されていない．一方で，顕著な崩壊を伴わない土砂生産が存在しており，このような現象は上記モデルでは対象とされていない．

(2) 斜面安全率F_sを用いた斜面崩壊土量の算定

表層崩壊を対象とした既往モデルとして，田村ら[9]，永谷ら[10]が**図-5**に示すように斜面上で分割したメッシュそれぞれが無限長斜面にあると想定し，斜面安全率F_sを算出する方法を用いている．

斜面安全率F_sは式(1)～(3)に示す通り，地形を表す斜面傾斜角や，崩壊土層の情報である崩壊土層厚や空隙率などと，崩壊土層内の水深から求められる．

$$F_s=\frac{c}{\gamma_s D sin\theta cos\theta}+\left[1-\left(\frac{\gamma_W}{\gamma}\right)\left(\frac{h_W}{D}\right)\right]\frac{tan\varphi}{tan\theta} \quad (1)$$

$$\gamma_s=\gamma_{sat}\left(\frac{h_W}{D}\right)+\gamma_t\left(1-\frac{h_W}{D}\right) \quad (2)$$

$$\gamma_{sat}=(1-n_S)G_S\gamma_W+n_S\gamma_W \quad (3)$$

ここに，F_s：斜面安全率，θ：斜面の傾斜角，γ_W：水の単位体積重量，γ_s：崩壊土層の単位体積重量，γ_{sat}：飽和体積単位重量，γ_t：湿潤単位体積重量，D：崩壊土層厚，c：想定すべり面の粘着力，φ：想定すべり面の内部摩擦角，h_W：崩壊土層内の水深（$=hcos\theta$），G_S：土粒子の比重（=2.65），n_S：崩壊土層の空隙率である．（計算メッシュサイズ（緯度・経度方向）：1/10 秒×1/10 秒（約 18.5m×15.4m））

本研究においても，流出計算によってメッシュに分割した崩壊土層毎に最大水深を推定し，斜面安全率F_sを用いて斜面崩壊土量を算出することとした．

(3) 本研究における斜面崩壊土量の算定方針

検討対象期間は，中小河川における維持管理計画検討（見直しによる変更を含む）の観点から 100 年とし，以下の算定方針に基づいて求める．

- 崩壊土層の土層厚Dは，対象区域の地質から検討対象期間における風化等による発達はごく小さいため，その厚さは崩壊以外の現象では変化しない．すなわち，検討対象期間で一度崩壊した斜面は，再び崩壊しない．

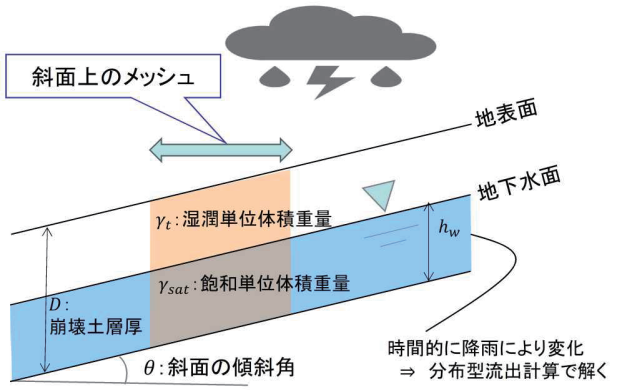


図-5 斜面安全率F_s算出モデル

表-1 計算条件の設定方針

設定値		設定方針	設定値
斜面傾斜角θ		メッシュ標高から算定	図-9 右上
崩壊土層	粘着力 c	主な標高低下区域の安全率が概ね 1.0 以下	1.5kN/m²
	内部摩擦角φ	一般的な砂礫	35°
	空隙率n_s	流出計算において，検証された設定値を採用	0.471
	土層厚D		1.0 m 現地状況も反映
崩壊土層内の水深h_w		流出計算により算出されるピーク水位hより設定	図-9 左下

- 検討対象期間で想定される降雨により，斜面安全率F_sが基準値（$F_s=1$）より小さい値が算出されるメッシュでは，不安定な状態となり表層崩壊が発生する，
- 樹木等を含めた崩壊土層全てが，一体となって崩壊する（一般的に表層崩壊と呼ばれている）現象以外に，当該メッシュが基準値以下となった直後に一気に崩壊せずに，その後のより小さい降雨により，徐々に削り取られる崩壊も，本研究においては表層崩壊として扱う．
- 検討対象期間に発生する総斜面崩壊土量は，表層崩壊が発生すると算出されたメッシュの総面積（約 286m²／1 メッシュ）に，現地調査などから設定した崩壊土層厚D（=1.0m）を乗じて求める．
- 計算条件（パラメータの設定）については，本来メッシュ毎に異なるが，それぞれに付与することは，現実的に困難である．そのため，**表-1**に示す設定方針に基づいて設定した．

(4) 流出計算による斜面上の水深hの算定

a) 流出計算手法とその特性

式(1)及び(2)に示すように，斜面安全率F_sの算定には，メッシュ毎の水深h_wの算出が必要となるため，本研究では RRI モデル[注1)]を使用した．RRI モデルは，対象流域をメッシュ分割し降雨解析と洪水氾濫を一体的に計算する分布型流出モデルであり，他の分布型流出モデルと比較して，パラメータ数や計算式が比較的シンプルである．また，**図-6**に示すように表層流＋地下流をモデル化することが可能であり，本研究において必要な崩壊土層内の水深を算出できる．

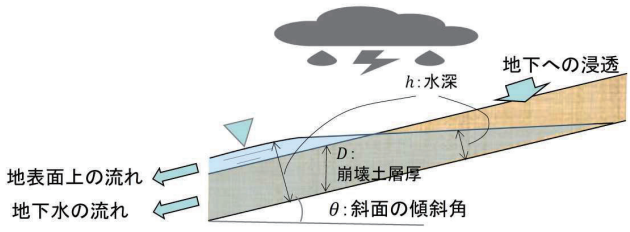


図-6 RRI における山地斜面における水流イメージ図

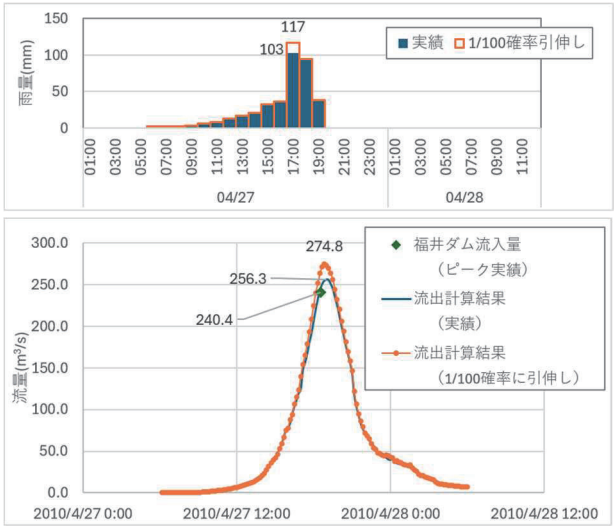


図-7 流出計算モデルの検証と検討対象降雨

b) 流出モデルの検証

対象区域で土砂災害の発生が確認されている 3 洪水を対象に計算を行い，福井ダム地点の観測流量との比較により流出モデルを検証した．**図-7** に対象降雨のうち，算出される山地域の水深が最も大きくなった[平成 22 年 4 月 27 日]の降雨量と流出計算結果，福井ダム地点での観測されたピーク流入量を示す．ピーク流量及びその発生時刻が再現され，流出計算モデルの妥当性が確認できた．

4 対象降雨の設定

(1) 土砂災害発生履歴と降雨条件

対象地域における斜面崩壊の発生と降雨条件の関係分析を，土砂災害発生履歴と流域の降雨量から実施した．

その結果，**表-2** に示すとおり，対象区域内で 2 箇所以上で土砂災害が発生した降雨は，総雨量が 290mm 以上であった．また，各降雨での災害発生箇所数と，1 時間，2 時間，6 時間雨量との回帰分析を実施した結果（**図-8**），1 時間雨量が最も強い線形関係が認められた．

(2) 対象降雨の設定

山地斜面で最も大きな水深が算出された[平成 22 年 4 月 27 日]の 1 時間雨量を 1/100 確率雨量まで引き伸ばし，対象降雨とする．

表-2 検討対象降雨の選定—土砂災害発生記録より—

	降雨発生日	気象状況	災害発生数 ／福井ダム集水域内	降雨量（mm） 総雨量※	1時間	2時間	6時間
1	平成19年07月10日	梅雨前線及び台風4号	5 ／ 1	307	73	100	146
2	平成20年04月10日	豪雨	7 ／ 1	294	99	136	252
3	平成20年06月29日	梅雨前線豪雨628-29	6 ／ 3	357	90	174	344
4	平成22年04月27日	平成22年4月27日豪雨	6 ／ 3	377	103	197	324
5	平成22年07月14日	平成22年7月13日梅雨前	1 ／ 1	183	35	68	108
6	平成23年06月16日	梅雨前線停滞に伴う豪雨	1 ／ 1	69	34	42	50
7	平成24年06月21日	梅雨前線による豪雨	2 ／ 1	231	36	66	137
8	平成25年10月24日	台風27号	1 ／ 1	288	24	41	100
9	平成30年07月05日	平成30年7月豪雨	5 ／ 1	314	57	92	272
10	令和03年08月19日		9 ／ 3	458	102	126	157

※ 無降雨6時間で降雨を分割した時の総雨量。

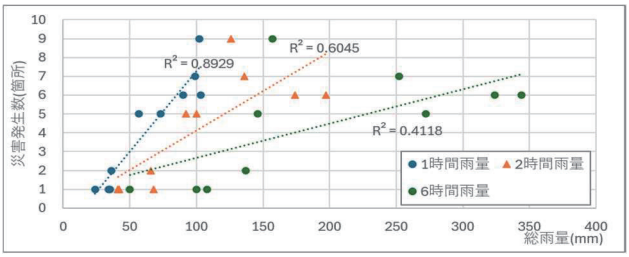


図-8 各時間雨量と災害発生数との相関

表-3 福井ダム雨量観測所における 1 時間雨量の確率処理結果と対象降雨の規模

確率規模	確率雨量 (mm/h)	検討対象規模	備考
1/10	93.5		SLSC≦0.040の手法でJacknife推定誤差が1/100確率で最小となった確率手法（対数ピアソンⅢ型）を採用
1/20	102.0	平成22年4月27日洪水（ピーク雨量103mm）は、おおよそ1/20確率	
1/30	106.3		
1/50	111.2		
1/100	117.0	○	

1/100 確率雨量は，平成 7 年～令和 6 年までの福井ダム雨量観測所の年最大 1 時間雨量を用いて確率処理を行い（**表-3**），117.0mm/h と求められた．また，実績のピーク雨量 103mm/h は，おおむね 1/20 確率規模であったことが分かった．

5 斜面崩壊土量の算定

(1) 斜面崩壊土量の算定手順と結果

式(1)～(3)より計算した斜面安全率F_sと，その過程で得られる値の分布図を**図-9** に示す．レーザ測量から整理するメッシュ標高（左上）から，傾斜角θ（右上）が求められ，流出計算より得られた最大水深h（左下）の値などを付与し，斜面安全率F_s（右下）を算出した．

崩壊土層に関わる情報のうち，空隙率n_s及び崩壊土層厚Dについては，流出モデル作成時に実測のピーク流量が再現される値を求め，これを斜面安全率F_sの算定時にも採用した（**表-1**）．

(2) 斜面崩壊土量算出結果の検証

a) 総崩壊土量の検証

対象降雨に対して算出された斜面の総崩壊土量は，対象区域で約 377 千 m^3/100 年となった．レーザ測量の標高差から得られる斜面低下量を集計すると約

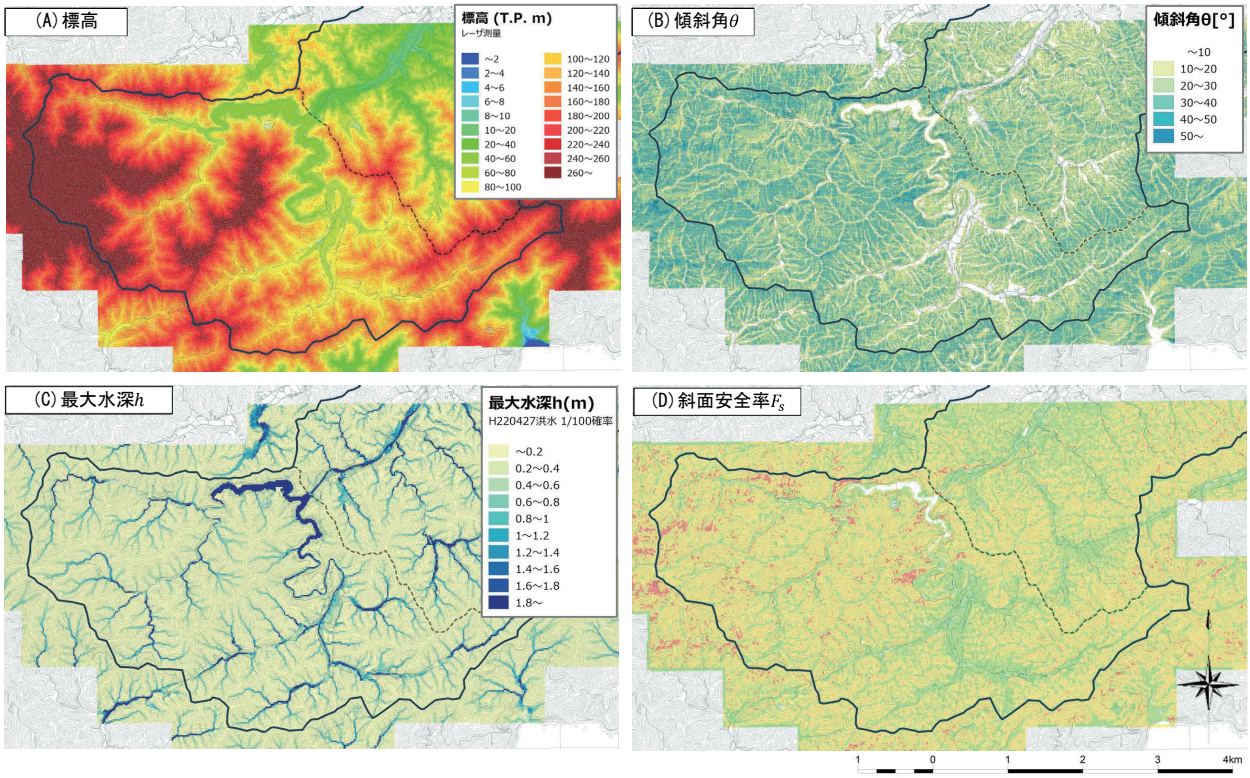


図-9 斜面安全率F_s算定に必要な条件と算定結果 [7)]

309 千 m³/11 年となっており，斜面崩壊の検討対象期間である 100 年間でほぼ均一に発生するとした場合は，算出結果が小さい値となった．

b) 斜面モデル別の崩壊土量の検証

対象区域内においても，斜面安全率F_sが基準値を下回る箇所の分布状況に偏りが見られたため，図-10 に示すように斜面を小さく分割し，集計を行った．

分割方法は始めに，崩壊した土砂を下流方向へ流送する能力を有する流路を河道モデルとして抽出する．現地調査から，集水メッシュ数が 200 以上となるメッシュの中心線を結んで河道モデルとした．次に，抽出された河道モデルが合流する地点で斜面を分割した．

図-11 に斜面モデル別の斜面崩壊土量算出結果とレーザ測量の標高差から計上される斜面低下量を示す．集計対象期間の長さが同じでないため，単純に比較できないものの，対象区域の西側では類似しているが，東側では特に標高低下が確認される区域で，斜面崩壊が生じない結果となっている．

この要因の一つとして，斜面の傾斜角θの違いが挙げられる．図-12 に斜面の傾斜角θと崩壊土量について，レーザ測量結果から得られる実測と計算結果

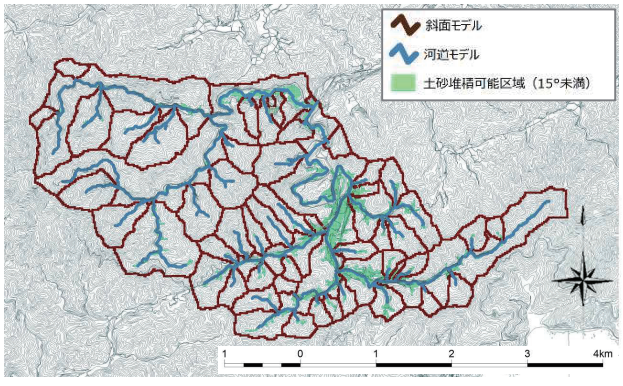


図-10 河道モデルと斜面モデル [7)]

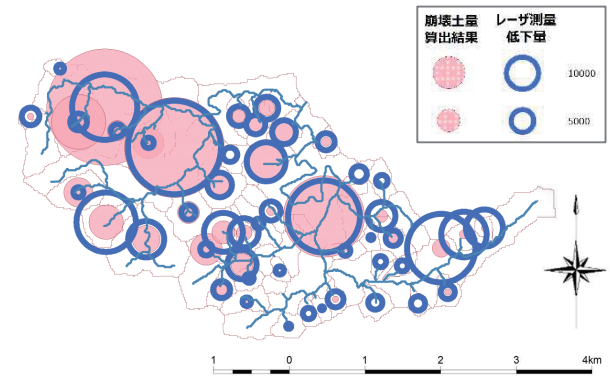


図-11 斜面モデル別の斜面崩壊土算出結果とレーザ測量による斜面低下量

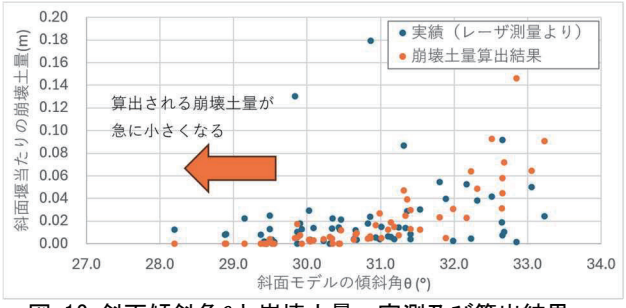


図-12 斜面傾斜角θと崩壊土量－実測及び算出結果－

を示す．斜面の傾斜角θが 30° 未満になると，斜面安全率F_sは 1.0 以上と算出され，崩壊土量が発生しない．崩壊土層に関わる設定値の再検討や，緩勾配であることから，人為的影響による土砂生産の可能性の調査等を踏まえた分析が必要である．

6　河道供給土砂量の算定

(1) 土砂供給過程の考え方

斜面崩壊により発生した土砂が河道へ供給される過程は，**図-13** に示すように崩壊土量が，河道に至るまでに緩勾配斜面に堆積し，その後残った崩壊土量が河道に供給される事象を計上するものである．

既出の方法で，河道モデルと斜面モデルに分割した後，河道モデル沿いの傾斜角θが 15° 以下の区域を土砂堆積可能区域と設定する（**図-10**）．斜面モデル毎に，設定された土砂堆積可能区域の面積を，河道モデル長で除したのち，左右岸に 2 分割して，土砂堆積可能幅とする．

これと，崩壊斜面の傾斜角θ（＝約 30～34° ），土砂堆積可能区域に堆積する土砂の角度φを 25° と設定した時に，得られる堆積可能土量と崩壊土量の差が，河道へ供給される土砂量として算出した．

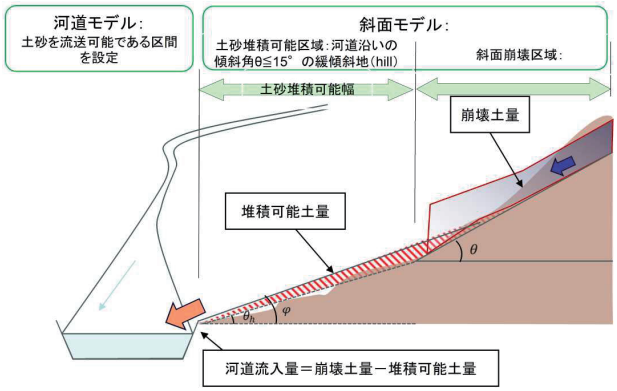


図-13 土砂供給過程と河道流入量の算定方法

(2) 河道供給土砂量の検証

算出された河道供給土砂量は，対象区域で約 84 千 m^3/100 年となった．これに対し，ダム堆砂量は約 73 千 m^3/30 年であり，河道への土砂供給が算定対象期間である 100 年間でほぼ均一に発生するとした場合は，算出結果がやや小さい値となった．

一方で，斜面崩壊土量についても，やや小さな値と判断されたこともあり，斜面崩壊土量の算出の精度が向上すれば，河道供給土砂量についてもその精度は向上すると捉えられる．

7　結論

100 年という長期間を対象とし，標高データや降雨データといった，比較的取得しやすい資料から，斜面崩壊に基づく河道供給土砂量の算出モデル（案）を示した．

その結果，斜面角度が 30° より緩い斜面において，再現が困難であったものの，それ以上の勾配を有する斜面に関して斜面崩壊の発生及びその土量について，おおよそ再現できた．

降雨イベント毎の斜面崩壊の発生箇所，崩壊土量が求められる場面には適応できないが，検討期間内の河道内への総供給土砂量が算定できたことから，河道維持管理計画策定に用いる境界条件としては，活用可能であることが示唆された．

謝辞：本研究に使用した資料の多くを徳島県から提供いただいた．また，勤務先の株式会社フジタ建設コンサルタントの同僚，それぞれの専門分野の立場から多くの助言をいただいた 3 名の友人の他，ご協力いただいたすべての方々に記して謝意を表します．

注釈

注1)RRI モデルプログラムの著作権は土木研究所（ICHARM），計算結果は RRI を改変したプログラムによるもの．

参考文献

1) 山野井一輝，藤田正治：土砂生産・土砂供給・土砂輸送堆積統合型モデルの開発と山地流域への適用，土木学会論文集 B1（水工学）,Vol70, pp.I_925-I_930，2014.
2) 笠井賢治，入星亮介，森友佑，永谷直昌：山地域における面的な土砂生産特性の分布，第 12 回土砂災害に関するシンポジウム論文集，2024.
3) 村田明広：10 万分の 1 徳島県及び周辺地域の地質図・徳島県及び周辺地域の地質（地質図説明書），2025.
4) 国立研究開発法人防災科学技術研究所：地すべり地形分布図，防災科研研究資料 HP, https://www.j-shis.bosai.go.jp/map/，2025.5.29.
5) 徳島県：福井ダム諸量データ，2025.
6) 徳島県：平成 17 年～令和 6 年土砂災害一覧表（阿南市・那賀町），2025.
7) 国土地理院：基盤地図情報（基礎項目），2026.
8) 松四雄騎：森林・水文・地形モデリングに基づく斜面崩壊予測（配布資料），2025 年度第 2 回防災講演会，2026.
9) 田村圭司，内田太郎，秋山浩一，森伸行，寺田秀樹：土木研究所資料 第 4129 号 表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル（案），2019.
10) 永谷言，水野直弥，石田裕哉，小澤和也，寶馨：分布型流出モデルの斜面崩壊予測への応用，土木学会論文集 F5（土木技術者実践），Vol.68, No.1, 16-26，2012.

（2026.5.29　受付）