

豪雨による小崩壊とそれに伴う斜面の不安定化に関する再現解析と対応策の検討（その2）

大日コンサルタント（株）正会員 ○藤井孝文， 葺沢竜夫， 河合亮典
岐阜大学 学生会員 桂川修， 国際会員 吉川高広， 沢田和秀

1. はじめに

郡上市大和町の奥田洞谷（図-1 参照）では，平成 30 年 7 月と令和 2 年 7 月の豪雨により，谷上部の同一斜面で 2 回の崩壊が発生した。既報告¹⁾では，その原因が斜面の地層構造と豪雨による地下水位上昇にあると分析されている。本報告は，崩壊メカニズムの解明と崩壊拡大の予防的対応策の検討を目的とする。1 回目の崩壊が 2 回目の崩壊の引き金となった現象を数値解析で再現し，崩壊拡大メカニズムを考察する。さらに，小規模崩壊発生段階での崩壊拡大の早期察知と，予防的対応策を講じるための調査・検討手法について提案する。



図-1 位置図

（出典：地理院タイルに被災箇所等を追記）

2. 災害の概要

本検討では，写真-1 に示す奥田洞谷の溪流源頭部で発生した 2 回の大規模な斜面崩壊に着目し，その崩壊と対策の状況について，前回の報告の一部を訂正・補足する。

平成 30 年 7 月豪雨では，溪流源頭部の斜面が崩壊し，崩土のうち約 $5,000\text{m}^3$ の土砂が下流へ流下した。既設の砂防堰堤は約 $4,000\text{m}^3$ の土砂を捕捉したが，滑落崖下方には約 $5,500\text{m}^3$ の不安定土砂が残存した。災害後，砂防堰堤の除石が行われ，さらに不安定土砂対策として通常砂防事業による砂防堰堤の嵩上げが計画された。また，斜面上部の地すべりブロック拡大のおそれから，治山事業による発生源対策も予定された。

しかし，令和 2 年 6 月豪雨により滑落崖上部にクラックが発生し，緊急度が高まったため，災害関連緊急砂防事業が採択された。この時点では，砂防堰堤嵩上げに加え，約 $30,500\text{m}^3$ の地すべりブロック対策工が計画されていた。ところが，これらの実施前の令和 2 年 7 月豪雨により，平成 30 年を上回る大規模な崩壊が発生し，約 $18,500\text{m}^3$ の土砂が流出した。この際，砂防堰堤は約 $3,000\text{m}^3$ の土砂を捕捉した。災害後は約 $7,200\text{m}^3$ の除石が行われたが，なお溪床には約 $11,300\text{m}^3$ の土砂が残存した。さらに斜面上部の地すべり土塊は約 $57,000\text{m}^3$ に拡大していたことが判明した。これを受け，災害関連緊急砂防事業の土砂収支計画が見直され，砂防堰堤嵩上げと地すべりブロック対策工が実施された。



写真-1 奥田洞谷の崩壊写真（左：第 1 回崩壊後 [平成 30 年 9 月 28 日撮影]，中央：クラック発生時 [令和 2 年 6 月 15 日撮影]，右：第 2 回崩壊後 [令和 2 年 7 月 8 日撮影]；岐阜県提供資料）

このように、一度崩壊した斜面が数年後に再崩壊し、被害が拡大する事例は少なくない。しかし、現行の災害復旧事業においては、予防保全的な対応が取りにくいという側面がある。今後は、さらなる被害拡大を防ぐため、予防保全を含めた幅広い対策の考え方を提案していく必要がある。そのためには、斜面の不安定化メカニズムを科学的に解明し、具体的な根拠に基づいて対策の必要性を示すことが重要である。

3. 検討方法

3.1 検討概要

本研究では、奥田洞谷崩壊斜面を対象に、部分的な崩壊を契機として斜面全体が不安定化し、崩壊が拡大する過程を数値解析によって再現することを試みた。数値解析には、斜面が降雨浸透によりどのように変形・破壊するかを解析可能な手法として、三相系弾塑性有限変形解析コード²⁾を用いた。解析に際し、本解析コード搭載の弾塑性構成式 SYS Cam-clay model³⁾のパラメータ設定に必要な三軸試験結果や、透水性・保水性に関する土質試験結果が十分に得られていなかったため、斜面モデルに実際の土質特性を直接反映することは困難であった。そこで本研究では、材料物性の厳密な再現よりも、実際の事例と整合する変形・崩壊挙動の再現を優先することとし、平成30年7月豪雨で発生した1回目の崩壊の形状と範囲を二次元解析モデルにより再現することを目標とした。解析の結果、遷急線付近では力学的に不安定な状態にあり、降雨が集水しやすいことが示された。これらの条件が、崩壊開始および斜面上部への進展を促進する主要因である可能性が示唆された。

3.2 解析断面と境界条件

奥田洞谷の1回目の崩壊の再現解析断面は、図-2に示すレーザ測量成果データから得られた3次元モデルを用いて作成した。この3次元モデルには、現地調査、地形図、およびボーリング調査から推定された難透水層の面構造も反映させた。

解析断面は図-3に示す通り、3次元モデルから、レーザ測量成果データに基づく地表面モデルと難透水層の面構造を考慮し、崩壊の主側線 a-A 線に沿った断面図を切り出して作成した。地質断面は、地質調査を参考に、難透水層の上部および下部の地層をそれぞれ風化岩1(以下W1層)、風化岩2(以下W2層)に区分した。地質調査および原位置試験の結果、W1層はせん断強度が低く、崩壊リスクの高い移動層とみなされる一方、W2層は比較的強度が高い不動層であると考えられる。

解析モデルの断面構成と境界条件を図-4に示す。崩壊が主にW1層内で進行し、W2層には達していなかったことから、W2層は解析対象から除外した。W1層上面の地表面形状は平成25年の航空レーザ測量データに基づき、難透水層の形状を保持しつつ、解析上の簡略化のため形状の折点数を削減した。材料は難透水

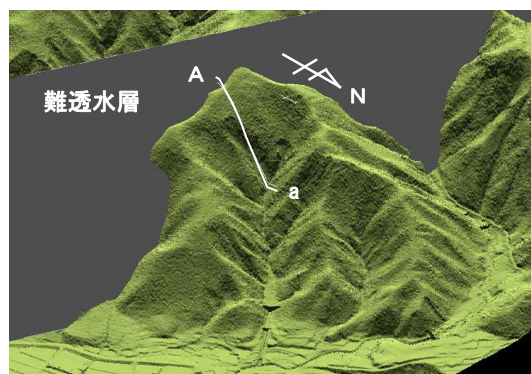


図-2 3次元地形モデル(平成25年レーザ測量成果から作成)

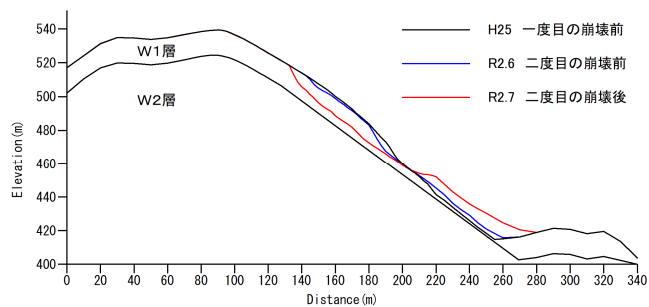


図-3 奥田洞谷の解析断面

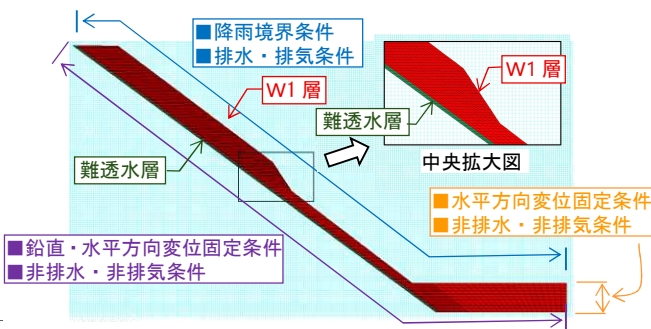


図-4 解析モデル断面図と境界条件

層と W1 層の 2 種類とし、それぞれ緑色、赤色で示した。解析範囲は水の流動条件を考慮して設定した。谷上部は尾根地形であり外部からの地下水流入が少ないと想定されるため、難透水層と W1 層の交点より上流側を除外した。谷下部についても、崩壊斜面への水流入がないと判断し、地形の起伏を省略した。

境界条件については、右端は水平方向変位固定および非排水・非排気条件、地盤底面は鉛直・水平方向変位固定および非排水・非排気条件、地表面は降雨境界および排水・排気条件とした。

3.3 材料パラメータの決定

土骨格の弾塑性構成式である SYS Cam-clay model の材料定数と初期値を表-1 に示す。前述の通り、本対象斜面では材料定数の決定に十分な土質試験結果が得られていないため、本解析コードを適用した実崩壊事例である逢初川土石流災害⁴⁾の報告書に掲載された盛土の材料定数を採用した。この材料定数を用いて、実際の崩壊を再現できるような初期値を検討して、設定した。

土の水分特性に関する van Genuchten⁵⁾モデルおよび Mualem⁶⁾モデルの材料定数、初期値、その他の物性値を表-2 に示す。飽和透水係数、乾燥透気係数、および水分特性に関する定数は、逢初川土石流災害の報告書を参考に、難透水層より W1 層の方が透水性が高く、保水性が低くなるよう設定した。水分特性曲線を図-5 に示す。初期状態は、構造、過圧密比、応力比、異方性、間隙水圧、間隙空気圧 (0 kPa)、および飽和度 (水分特性曲線から計算) を基礎地盤・堤体内で一様と仮定し、比体積のみ土被り圧に応じて分布させた。

表-1 土骨格の構成モデルに関する材料定数の初期値

弾塑性パラメータ			
		難透水層	W1 層
正規圧密線 ($v-\ln p'$) における $p'=98.1$ kPa のときの比体積	N	2.22	2.22
限界状態定数	M	0.95	0.95
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.15	0.15
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.05	0.05
ポアソン比	ν	0.30	0.30
発展則パラメータ			
正規圧密土化指数	m	10.0	10.0
構造劣化指数	a	0.1	0.1
	b	1.0	1.0
	c	1.0	1.0
	c_s	0.2	0.2
回転硬化指数	b_r	0.0	0.0
回転硬化限界面	m_b	1.0	1.0
初期値			
構造の程度	$1/R'_0$	2.0	2.0
過圧密比	$1/R_0$	2.0	2.0
間隙比	e_0	分布	分布
応力比	η_0	1.0	1.0
異方性の程度	ζ_0	0.0	0.0

表-2 水の水分特性に関する材料定数とその他の物性値

水分特性曲線			
		難透水層	W1 層
最大飽和度 %	s_{max}^w	100.0	100.0
最小飽和度 %	s_{min}^w	60.0	60.0
van Genuchten パラメータ kPa^{-1}	α	0.075	0.10
van Genuchten パラメータ ($m'=1-1/n'$)	n'	2.00	2.00
飽和透水係数 m/s	k_s^w	7.50×10^{-7}	1.02×10^{-5}
乾燥透気係数 m/s	k_d^a	1.00	10.0
初期間隙水圧 kPa	p_0^w	-6.0	-6.0
その他の物性値			
土粒子密度 g/cm^3	ρ^s	2.709	2.709
水の体積弾性係数 kPa	K_w	2.19×10^6	2.19×10^6
空気の気体定数 $m^2/s^2/K$	\bar{R}	287.042	287.042
絶対温度 K	Θ	293.15	293.15

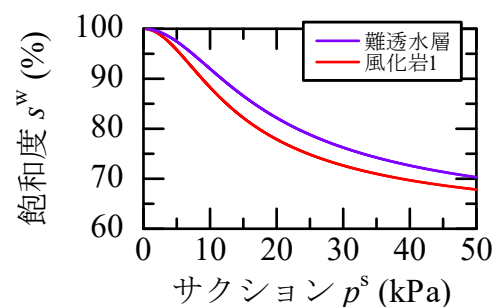


図-5 不飽和浸透特性

3.4 降雨条件

降雨条件には、奥田洞谷の最寄りの観測所である水文水質データベースの八幡観測所の観測データを用いた。

事前降雨として、2014年から2017年の年間降水量を整理した結果、年平均降水量は約2,600mmであった。そこで、助走期間の降雨条件として、年平均降水量2,600mmから年平均蒸発量600mmを差し引いた2,000mmを地表面境界条件として与え、定常状態に達するまで数値解析を実施した。

崩壊の再現計算は、助走期間の後に、豪雨状態

の降雨として、観測所の12日間（平成30年6月27日～7月8日）について、日雨量に相当する降雨をそれぞれの時間帯に与えた。なお、災害発生日は計算期間12日目の7月8日未明（深夜2～3時頃）である。

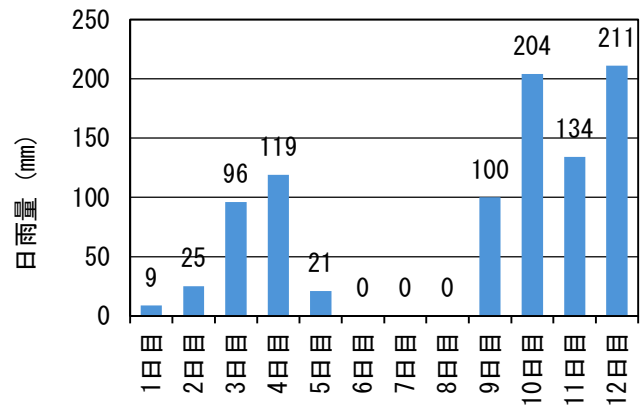


図-6 豪雨時の降雨データ

4. 解析結果

4.1 助走期間

助走期間の解析終了後の定常状態を図-7に示す。飽和度分布からは、斜面上部から下部へ、また地下から地表にかけて飽和度が高くなる傾向が確認された。特に、斜面中央の遷急線では局所的に飽和度が高く、水が滞留していることが示された。これは、遷急線を境に難透水層に直交する斜面幅が小さくなり、斜面内の水が滞留するためと考えられる。過圧密比分布では、遷急線周辺に過圧密比が1に近い領域が分布しており、当該部位が力学的に不安定な状態にあることが示唆された。

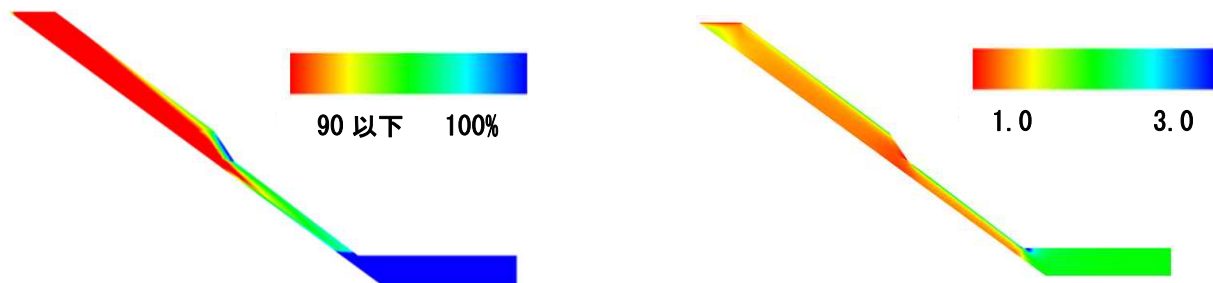


図-7 定常状態 左：飽和度分布，右：過圧密比分布

4.2 豪雨期間

豪雨期間における斜面のせん断ひずみ分布の経時変化を図-8に示す。助走期間後は、実際の日雨量に基づいて再現解析を行った。せん断ひずみ分布は、11日経過時までは大きな変化がなく、遷急線下部でわずかな増加がみられる程度であった。その後、11日7時10分19秒経過時に、遷急線を中心とした円弧状のせん断ひずみ増大が生じ、下部から上部へ順次すべりが形成された。さらに約30秒後には、すべりは斜面上部まで進展した。なお、本解析では12日目に崩壊が発生し、実際の一度目の崩壊と同日であり、発生時期も実現象に近い結果が得られた。

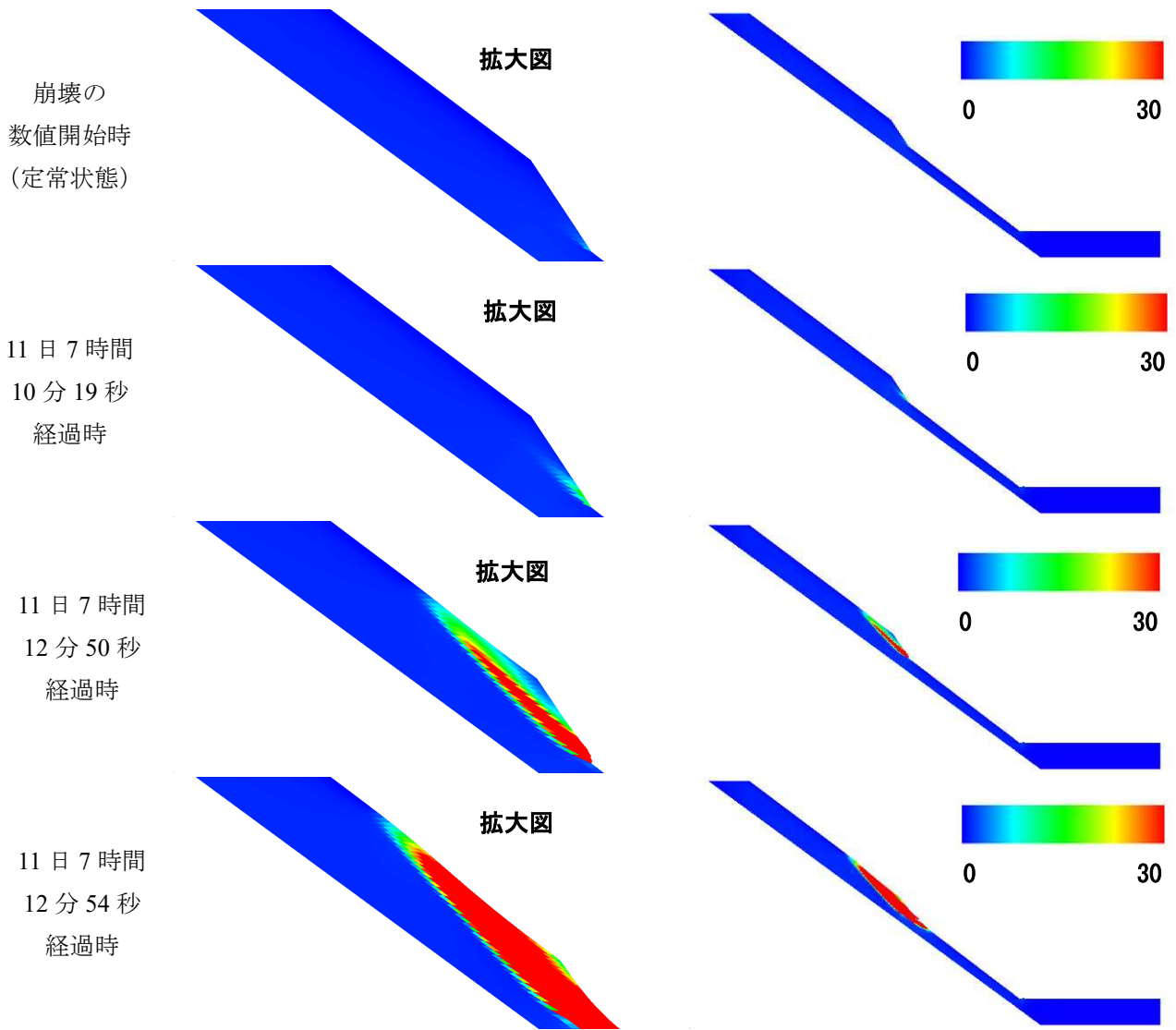


図-8 せん断ひずみ分布の経時変化

4.3 考察

遷急線で崩壊が開始した理由を、図-9 に示す飽和度分布の経時変化および図-10 に示す過圧密比分布の経時変化から考察する。

図-9 の定常状態より、解析初期から遷急線付近では局所的に飽和度が高く、地下水が滞留しやすい状態にあったことが確認された。これは、降雨時に表層水や浸透水が地形条件により遷急線へ集中的に流下・集積しやすいためと考えられる。降雨の継続に伴い、高飽和度域は地表面に沿って拡大し、その結果、間隙水圧の上昇と有効応力の低下が進行したと考えられる。

さらに、図-10 の定常状態より、遷急線付近では解析初期から過圧密比が小さく、他の領域に比べて力学的に不安定な状態にあった。その後、図-10 (11日7時間12分46秒経過時) に示すように、降雨の進行に伴って過圧密比の小さい領域を起点として円弧状にひずみが蓄積し、その領域が斜面上方へ拡大することで、最終的にせん断破壊に至った。

以上より、遷急線では、水が集積しやすく飽和度が上昇しやすい水理条件と、過圧密比が小さく力学的に不安定な状態が重なっていたため、降雨に伴う強度低下が最も早く進行し、崩壊が遷急線から開始したと考えられる。

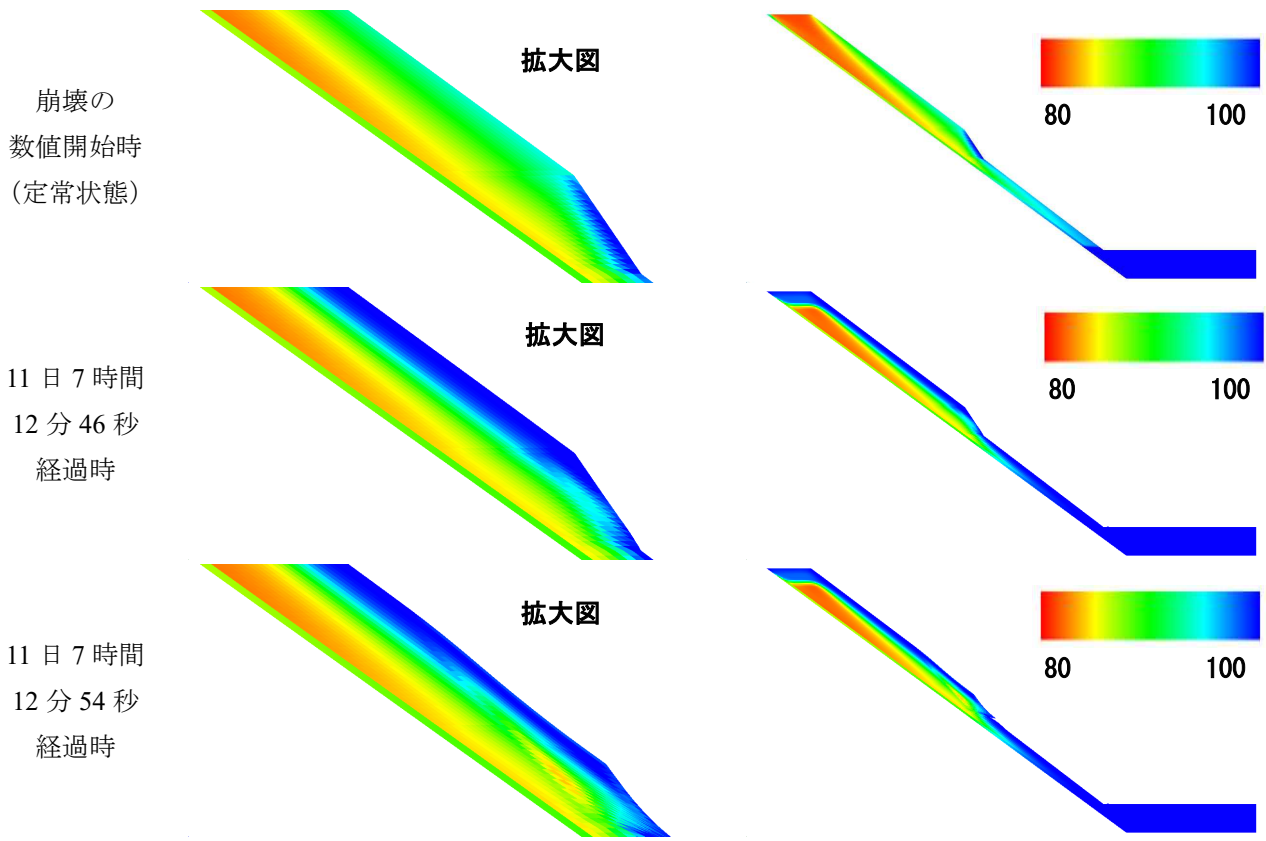


図-9 飽和度分布の経時変化

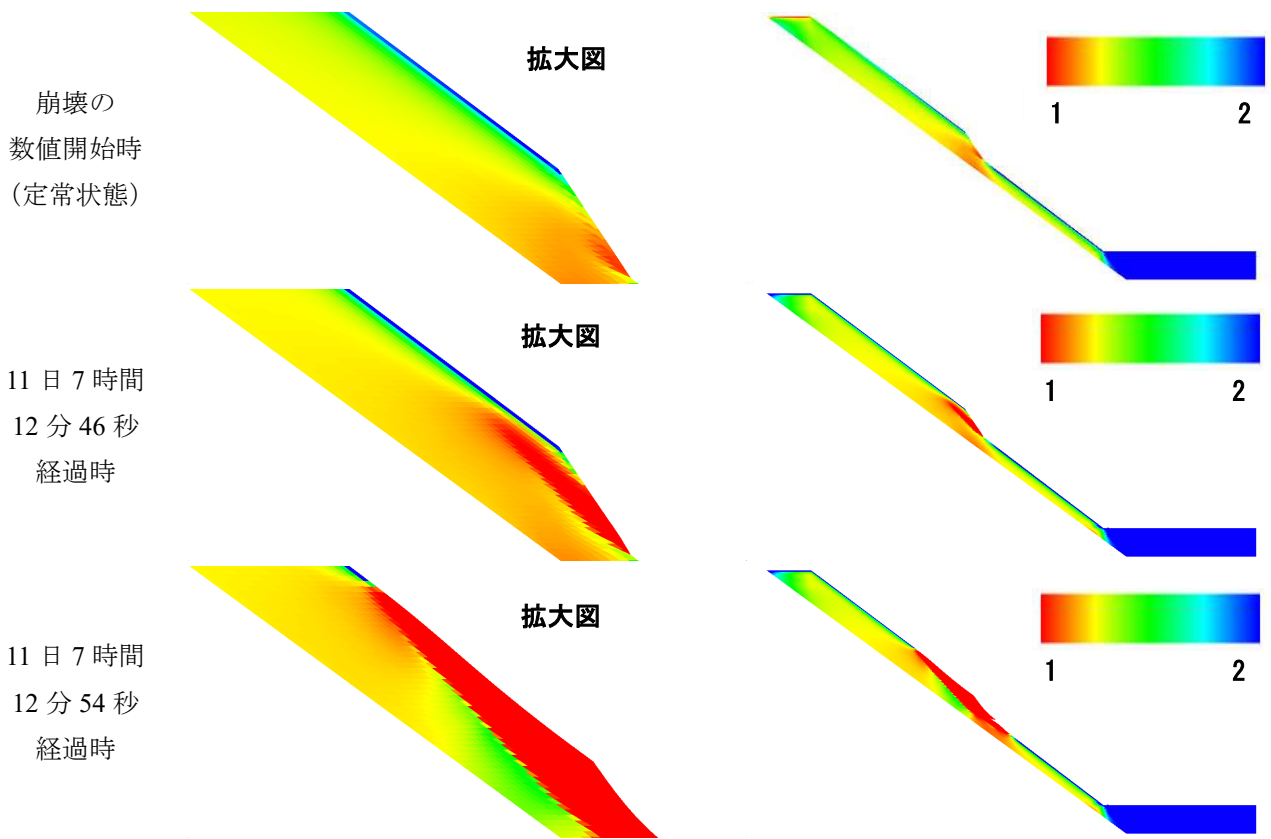


図-10 過圧密分布の経時変化

5. まとめ

5.1 再現解析について

本検討では、平成30年7月豪雨および令和2年7月豪雨により同一斜面で二度の崩壊が発生した奥田洞谷崩壊斜面を対象とし、降雨浸透と地盤変形を考慮した数値解析により、斜面崩壊の進行過程の再現を試みた。特に、一部の崩壊を契機として斜面全体が不安定化し、崩壊が拡大していく過程に着目し、一度目の崩壊形状および崩壊範囲を再現可能な二次元解析モデルを構築した。

解析の結果、遷急線付近では解析初期から飽和度が高く、地下水が滞留しやすい水理条件にあること、さらに過圧密比が小さく、力学的に不安定な状態にあることが確認された。降雨の進行に伴い、これらの領域を中心にせん断ひずみが局所化し、斜面下部から上部へとすべりが拡大することで、実際の崩壊過程と整合的な挙動が再現された。このことから、遷急線における地下水の集中と力学的不安定性の重なりが、崩壊開始位置を規定する主要因である可能性が示唆された。

また、崩壊発生時期は解析上12日目となり、実際の発生時期と概ね一致する挙動を表現することができた。以上の結果から、本研究は、降雨時における斜面内部の水理・力学挙動を統合的に評価することで、斜面崩壊の進行メカニズムを説明できる可能性を示した点に意義がある。

今後は、本検討で明らかになった不安定化メカニズムを1回目の崩壊後の地形モデルに反映し、その後の降雨条件を考慮することで、2回目の崩壊への影響を分析する。

5.2 小規模崩壊における拡大防止と予防策の提案

小規模崩壊は背後斜面の安定性に影響を及ぼし、二次災害や広範囲な崩壊への拡大リスクを内包する。小規模崩壊発生後の二次災害防止および崩壊拡大抑制のためには、崩壊箇所だけでなく、小規模崩壊が背後斜面の安定性に影響を及ぼす範囲を特定し、その安定性評価と予防策の検討が極めて重要である。本解析で得られた知見を踏まえると、遷急線付近における地下水の集中や過圧密比の小さい領域は、水理的・力学的に不安定化しやすい箇所であり、これらの潜在的な脆弱性を特定することに特に留意すべきである。

したがって、崩壊発生時には、本解析で示された不安定化しやすい箇所を重点的に考慮しつつ、崩壊箇所だけでなく影響範囲における地質構造や地下水状況を詳細に調査し、崩壊拡大リスクを総合的に判断する必要がある。安定性評価の結果、不安定化の兆候が見られる場合や将来的なリスクが高いと判断される場合には、速やかに予防的な対応策を講じるべきである。また、災害対応の仕組みとして、今後は、災害復旧事業において予防保全的な対応が困難であった溪流上部斜面に対し、予防保全を含めた幅広い対策の考え方を推進すべきである。

そのためには、斜面の不安定化メカニズムを調査や解析を通じて科学的に解明し、実施すべき調査内容や対応を具体的な根拠をもって示すことが重要であると考えられる。

謝辞

本検討にあたり、貴重な資料をご提供いただきました岐阜県県土整備部、郡上土木事務所に深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 蕨沢ら (2025) : 豪雨による小崩壊とそれに伴う斜面の不安定化に関する再現解析と対応策の検討, 第34回調査・設計・施工技術報告会論文集, pp.013-020.
- 2) Noda, T. and Yoshikawa, T. (2015) : Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, Vol. 55, Issue. 1, pp. 45-62.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.12.004>

- 3) Asaoka, A. et al. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57.
https://doi.org/10.3208/sandf.42.5_47
- 4) van Genuchten, M.T. (1980) : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, No. 5, pp. 892-898.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- 5) Mualem, Y. (1976) : A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, pp. 513-522.
<https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- 6) 吉川ら (2023) : 2021年7月熱海土石流災害における盛り土崩壊メカニズムの解明-三相系弾塑性解析と吸水軟化試験-, *地盤工学会誌*, vol.71, No.3, pp.30-40.
- 7) 国土交通省 : 水文水質データベース (八幡) 日雨量データ, 入手先 <
<http://www1.river.go.jp/cgi-bin/SrchRainData.exe?ID=105091285502450&KIND=2&PAGE=0> > (参照
2025.4.15)