# 7・20 水俣市斜面崩壊の数値解析的考察

ANALYTICAL CONSIDERATION ON 7 · 20 MINAMATA SLOPE FAILURE DISASTER

大塚 悟<sup>1</sup>・岩部 司<sup>2</sup>・磯部 公一<sup>1</sup>・堀越 俊寛<sup>3</sup> Satoru OHTSUKA, Tsukasa IWABE, Koichi ISOBE and Toshihiro HORIKOSHI

<sup>1</sup>長岡技術科学大学 環境・建設系(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
<sup>2</sup>八代工業高等専門学校(〒866-8501 熊本県八代市平山新町2627)
<sup>3</sup>前長岡技術科学大学大学院(現JR貨物(株))(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

Key Words: Slope stability, Seepage property, Saturated-unsaturated seepage analysis, Case study

# 1. はじめに

去る 2003 年 7 月 20 日未明に発生した熊本県水侯市 室川内集地区の土石流災害は、多くの尊い人命と財産 を失う災害であった。この土石流は集川上流の右岸斜 面で起こった大規模な斜面崩壊が発端となったと言わ れている。斜面崩壊の原因について、地形や地質的な 背景、降水量の記録、現地調査などをもとに、多くの 報告事例がある<sup>1)</sup>。自然斜面は、非常に複雑な地盤条 件や水理条件にあることから、それらを正確に把握す ることは困難である。同じような災害を繰り返さない、 そして今後の被害軽減に活かすためにも素因情報とな る地盤条件、誘因情報となる降雨条件などを様々な観 点で検討することが重要である。

豪雨による斜面崩壊は、多くの場合、地盤の飽和化、 地下水位の上昇、それらに伴い、地盤のせん断強度が 減少して発生する。著者らはこれまでに豪雨時の斜面 安定性評価の精度向上を目的に、不飽和・飽和浸透解 析と剛塑性有限要素法による斜面安定解析手法を開発 し、斜面の飽和度の変化や地下水位の上昇を反映した 破壊形態の違いなどを事例解析により検討してきた<sup>20</sup>。 本論文は市販の浸透流解析ソフトウェア「Soil Plus Flow<sup>30</sup>」を使用し、浸透流解析結果を「剛塑性有限要 素解析<sup>40</sup>」と連成させて不飽和土の力学に則した斜面 安定解析を行った。

これらの解析手法の妥当性を確認するために,まず 地盤条件が均一である模型斜面の降雨実験結果と比較 することで,その適用性を検証する。その後,水俣市 土石流災害の原因となった集川上流右岸の斜面に対し て,崩壊に至るまでの斜面内の水理条件と斜面安定性 の変化について事例解析し,斜面崩壊の発生メカニズ ムを検討した。

## 2. 解析手法の妥当性の検証

大野ら<sup>5</sup>は、斜面背面からの浸透水と降雨が作用す る人工斜面について、浸潤線・飽和度の上昇によるサ クションの変化が斜面の安定性に及ぼす影響を調べる ために大型模型土槽による降雨時斜面崩壊試験を実施 している。この実験をシミュレートすることにより、 本解析手法の妥当性を検証する。

## (1) 模型実験の概要

模型実験は高さ 3.0m, 天端幅 3.0m, 法面勾配 1:2 の盛土半断面形状に山砂を締め固め, 盛土背面の外水 位を 2.3m に固定すると共に, 15 mm/hr の降雨を降ら せて行われた。試料の透水係数は $k_s = 4.5 \times 10^2$  cm/sec, 強度は飽和状態で c'=0 kPa,  $\phi'=31\sim33^\circ$ , 不飽和 状態で c = 4~8 kPa,  $\phi=32\sim34^\circ$  であった。浸潤線 が法面表層に達したのと同時(経過時間 13.25 hr)に法 面の表層崩壊が起こり, それに追従して上方へ 4~5 段階の円弧すべりによる崩壊が発生した。

# (2) 解析方法

解析は図-1に示した解析モデルについて浸透流解 析を行ない,降雨開始後の各段階において安定解析を 実施した。浸透解析では不飽和土の浸透特性について van Genuchten が提案するモデル<sup>6)</sup>を用いて斜面内の圧

表 - 1 地盤物性値



図 - 2 不飽和浸透特性

カ水頭を求めた。地下水位以下の飽和領域では有効応 カ解析を、地下水位上部の不飽和領域についてはサク ションによる強度増加を考慮した全応力解析を実施し た。不飽和領域では $\phi = \phi$ 'を仮定し、c はサクション に応じて加藤らの式<sup>7)</sup> により変化させている。解析に 用いた地盤物性値を表-1に示す。

また、不飽和特性は実測データが不足していること から、実験における飽和度の計測値より試行錯誤によ り逆算した。不飽和浸透特性を図-2に示す。水頭条件 は、モデル左側面(盛土背面)に浸透水による圧力水 頭を設定し、実験条件に対応して実験開始0hrより水 頭を上げ始め1hrで水位2.3mとして終了まで固定水 位とした。降雨条件は、実験開始より上面(天端およ び法面)に対して降雨強度15mm/hrを終了まで与えた。 水理境界は、モデル上面が飽和した場合、自由に水が 流出できる透水境界とし、底面は水の出入りの無い不 透水境界とした。

# (3) 解析結果

模型実験では、深度 0.4m と 0.9m の 2 地点で飽和度 が計測されている。図-3は、この実測値と解析値の飽 和度経時変化を示している。計測では斜面表面に近い 深さ 0.4m の地点の方が、深い方の 0.9m 地点より飽和 度が大きい結果が得られているが、計測値に合う条件 は設定しにくいことから、鉛直方向には水の流れが生

	1:2		
浸透特性	飽和体積含水率 $ heta_{s}$	0.45	
	残留体積含水率 $\theta_r$	0.045	
	透水係数 k(cm/sec)	4.5E-02	
	比貯留係数 S <sub>s</sub> (1/m)	1.0E-04	
	有効間隙率 n <sub>e</sub>	0.45	
強度特性	せん断抵抗角 φ'(゜)	31.0	
	粘着力 c' (kN/m²)	0	
	単位体積重量 $\gamma_{\rm t}$ (kN/m <sup>3</sup> )	17.0	



図 - 3 計測点における飽和度の経時変化



じない等水頭条件を仮定して初期飽和度を設定し、斜 面の崩壊シミュレーションで重要な中盤から破壊時刻 付近の飽和度計測結果を説明するように不飽和浸透特 性を逆算手法により設定した(図-2)。図-4は、不飽 和・飽和浸透流解析で得られた地下水位を示しており、 時間の経過とともに上昇する過程がわかる。図-5は時 間経過に伴う斜面安全率の変化である。雨水・地下水 の浸入により、安全率は低下し、崩壊時刻である13hr には 0.998 となり、模型実験とほぼ同時刻に崩壊する 結果が得られた。図-6はこの破壊時刻における相対ひ ずみ速度の分布(最大ひずみ速度を1.0、最小ひずみ速 度を 0.0 と設定) を示すが、斜面法尻の浸潤面以下で 崩壊が発生していることがわかる。このような法先で の小崩壊は飽和化に伴う有効応力の減少と粘着力の喪 失が原因であると思われ、破壊形態はほぼ実験結果と 整合するものであった。

このように,浸透流解析で土構造物の間隙水圧や飽 和度分布などの定量的な評価が精度よく実施できれば, 斜面の崩壊時刻や破壊形態を精度よく予測できること が確認でき,本解析手法の妥当性を確認した。

# 3. 水俣市宝川内集地区土石流災害の事例解析

本災害の発生原因や災害復旧計画などが水俣市土石 流災害検討委員会(委員長 熊本大学 北園芳人教授) で詳細に検討されており,水俣土石流災害検討委員会 報告書<sup>8)</sup>(以下,委員会報告書と記述)に報告されて いる。この中で崩壊発生の原因の一つとして,土石流 発生前の6月に,先行降雨として深川観測局で590 mm/ 月を記録していることが指摘されている。これは年間 平均降水量(2,072mm)の約30%に相当する。さらに, その後の調査研究で,凝灰角礫岩上に風化した粘土層 があったこと<sup>9,10</sup>が崩壊に大きく影響した可能性が指 摘されている。

以上から,事例解析では上記の2点を重視して次の ように地質のモデル化,地盤物性値等を決定した。

## (1) 地質のモデル化

崩壊地周辺の地層は,崖錐性堆積物,安山岩(上位 層),凝灰角礫岩,安山岩(下位層)の4層に区分され る。また,それら各層は風化の程度や岩相が異なるこ とから,以下のように細分化される。

安山岩(上位層)

- 地層①:最上位層に粘土状で分布する強風化安山岩
- 地層③:岩組織を残し団結粘土状を呈す強風化安山岩
- 地層④: 亀裂が発達し礫状〜短柱状を呈す風化安山岩 で柱状節理が発達している。
- 地層⑤:比較的新鮮な安山岩
- 崖錐堆積物
- 地層②:崖錐堆積物
- 凝灰角礫岩
- 地層⑥:指圧で圧砕できる程度に風化した脆弱な上位 層
- 地層⑦:比較的安定した岩組織を残す下位層
- 安山岩
- 地層⑧ : 新鮮な安山岩
- 粘土層
- 地層⑨:地下水によって凝灰角礫岩が粘土質化した粘



地層①

図-7 各ケースの解析モデル

# 土層 (文献<sup>9),10)</sup>による)

地層⑨の存在が今回の破壊に関与したとの調査結果 に基づいて、図-7に示す2つの解析モデルを作成した。

Case 1: 地層⑨を考慮しない

Case 2: 地層⑨を考慮する

なお,崩壊のすべり面が地層⑤,⑥の上部であること, その下の地層⑦は新鮮な岩層であることを考慮すると, さらにその下位の新鮮な安山岩層⑧は崩壊に直接関係 しないと判断されるためモデル化を省略した。

## (2) 地盤物性値

6月17日~24日では462mmの先行降雨があったに もかかわらず斜面は崩壊せずに、約1ヵ月後の7月19 日からの後期降雨で崩壊した。この地域は風化度合い の異なる安山岩が地表を覆っていることから、その風 化特性に着目して透水係数に異方性を取り入れた。安 山岩は風化によって柱状に節理が発生することから鉛 直方向に透水係数を大きく、水平方向に透水係数を小 さく設定した。鉛直方向と水平方向の透水係数の比は、 後期降雨で斜面が崩壊した事実を説明するように定め ている。本論文では風化が進展すると、透水係数が大き くなるほか鉛直方向に対する水平方向の透水係数が大 きくなると想定して、強風化岩では透水係数を大きく、 また等方透水係数を設定した。

表-2に浸透流解析及び安定解析に使用した物性値 を、図-8に不飽和浸透特性曲線を示す。これらは、水 俣土石流検討委員会で解析に使用された値である。た だし、地層④の透水係数は鉛直方向の透水係数を1オ ーダー大きくし、地層⑨については、地盤調査結果な どの情報がないため、粘性土であることを考慮して透 水係数および不飽和浸透特性を文献<sup>11)</sup>を参考に設定し た。強度定数については、森山ら<sup>10)</sup>が現場から採取し た粘性土の一面せん断試験結果を参考にした。試験で は粘着力が c d=37.4kN/m<sup>2</sup>が得られているが、やや大 きいように思われることから、崩壊時刻にて安全率が 1.0 を下回るよう粘着力 c'を試行により定めた。その結 果 c'=2.40 kN/m<sup>2</sup>という妥当な値が得られた。一方、 内部摩擦角  $\phi$ 'については一面せん断試験結果の 9.5° を使用した。

## (3) 境界条件

## a)初期水位

初期水位は、当該地区の過去5年間の平均年間降雨 量(2,072 mm/年)を与え算出した。Case 1,2ともに ほぼ同じ位置に、難透水層である地層⑤,⑥,⑨の上 面に地下水位が形成された(地下水位は後述の図-9に 示す)。

#### 表 - 2 各層に用いた地盤物性値

地層番号		1	2	3	4	5	6	Ī	9	
浸透 特性	水分特性曲線		風化帯	風化帯	風化帯	風化帯	新鮮岩	新鮮岩	新鮮岩	粘性土
	飽和体積含水率 $\theta_s$		0.200	0.200	0.150	0.150	0.050	0.050	0.050	0.100
	残留体積含水率 $\theta_r$		0.007	0.007	0.005	0.005	0.009	0.009	0.009	0.058
	透水係数	水平	1.0E-03	1.0E-03	1.0E-03	5.5E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-07	1.0E-04
	k (cm/sec)	鉛直				1.0E-03				
	比貯留係数 S <sub>s</sub> (1/m)		5.0E-04	5.0E-04	5.0E-04	1.0E-04	1.0E-04	1.0E-05	1.0E-06	1.0E-03
	有効間隙率 n <sub>e</sub>		0.20	0.20	0.15	0.15	0.05	0.05	0.05	0.10
強度 特性	せん断抵抗角 ∅′(°)		23.0	23.0	23.0	27.0	45.0	27.0	38.0	9.5
	粘着力 c' (kN/m²)		29.43	29.43	29.43	63.77	2354	63.77	981	2.40
	単位体積重量 2/1. (kN/m <sup>3</sup> )		16.19	16.19	16.19	20.11	25.02	20.11	24.53	17.83

↓\_\_\_\_\_↓\_\_\_\_↓\_\_\_\_↓\_\_\_\_↓\_\_\_\_↓\_\_\_\_ 注)地層⑧はモデル化を行なっていないため物性値は省略



#### b)降雨条件

降雨量データは崩壊地域に近い熊本県深川観測局に おいて観測されたデータを使用した。土石流発生前の 6月には深川観測局で 590 mm/月という降水量を記録 している。これは過去5年間の年間平均降水量 (2,072mm)の約30%に相当しており,先行雨量とし て地下水供給に影響を及ぼしたことも考えられること から,事前降雨として崩壊日7月20日から約3ヶ月前 の5月1日からの降雨データを設定した。

## c)水理境界条件

モデル左側面,底面,右側面は不透水境界とした。 左側面は尾根境界となっており、地下水の供給がない ものと考えられる。底面は地層⑦が難透水性であるこ と,右側面は河川が定常的に流れており,河川水よっ て常に飽和化していると考えられる。モデル上面は, 降雨浸透境界とした。

## (4) 解析結果

#### a)先行降雨による影響

まず,地下水位の変化を図-9に示す。両ケースとも 一連の豪雨開始前において,地下水位が初期水位より も上昇しており,特に斜面中部から上部にかけて最大 で2m近く上昇している。これは崩壊1ヶ月前の6月 17日~19日の3日間合計雨量が287 mm,17日~24 日の8日間合計で462 mmの多量の降雨が,時間をか



日雨量(6/15~7/20)

けて地盤内に浸透したことによる。特に斜面上部の地 層④ (風化安山岩) 内では,発達した柱状節理によっ て水平方向の地下水の流れが鉛直方向に対して制限さ れるので、長期間にわたって斜面下部へ平常時よりも 高い地下水位を供給していたと考えられる。

図-10, 11 は安全率の経時変化を先行降雨の影響と 崩壊時刻付近で表したグラフである。両ケースとも6 月中旬の降雨後に安全率が著しく低下しており、先行 降雨の影響がかなり大きかったことが伺える。

# b) 粘土層(地層9)の影響

崩壊時刻で安全率が1を下回るように粘土層⑨の粘 着力を逆算していることから、Case 2を基準にして考 えると、図-10、11より粘土層がなければ Case 1 では 安全率が1.95という値になり崩壊には至らない。

図-12 において Case 1 は相対ひずみ速度の分布から せん断領域が風化帯と新鮮岩の境目に形成され、破壊 形態からは、相対ひずみ速度の大きな領域がすべり面 となり斜面下部から上部にかけて実際の破壊形態に近 い大規模崩壊がみられる。Case 2 では粘土層から斜面 下部にかけてせん断領域が形成され、破壊形態は斜面 先で崩壊が発生している。なお、図の破壊形態とは、 せん断力を低減させていき,安全率が1を下回った場 合に算出されるひずみ速度分布(相対的な変化量とそ

の向き)から求めた破壊形態(仮想破壊形態)を表わ す。

また,図-13の飽和度についてみると両ケースとも すべり面付近は飽和度が100%に達していることから、 一連の豪雨によって斜面下部の地下水位が上昇し、不 飽和土のせん断強度低下、不飽和土の重量増加による せん断力増加、さらに飽和土においては、間隙水圧の 上昇によるせん断強度低下により、粘土層がすべり面 となって崩壊したと考えられる。また、可能性として この第一次崩壊をきっかけに、その後、斜面上部に崩 壊が拡大したことも考えられる。

## 4. 結論

不飽和・飽和浸透流解析と剛塑性有限要素解析を連 成させて模型斜面での適用性を検証した。その後、水 俣市土石流災害の斜面に対して, 崩壊する前月の先行 降雨の影響とすべり面付近の粘土層の存在に着目して 事例解析を実施した。本論文で得られた結論は以下の 通りである。

(1) 模型斜面の浸透破壊実験に対して、浸透流解析と 斜面安定解析を実施した結果、土構造物の間隙水 圧や飽和度分布などの定量的な評価が精度よく実



図 - 12 崩壊直後(7/205時)における相対ひずみ速度分布,地下水位,破壊形態



図 - 13 崩壊直後 (7/205時) における飽和度と破壊形態

施できれば、斜面の崩壊時刻や破壊形態を精度よ く予測できることが確認できた。

- (2)水俣土石流災害の斜面崩壊では、安山岩の風化モデル(柱状節理のような縦方向の割れ目が卓越するような風化岩)を透水係数の異方性として表現することで、先行降雨により地下水位が高い状態に保たれ、後期降雨により崩壊に至った経過を説明することができた。
- (3) すべり面付近に粘土層が存在することが、斜面崩 壊に不可欠な要因になっていることが確認され、 崩壊は段階的に斜面上部へ進行した可能性が高い ことが示された。

謝辞:本研究の遂行にあたり,熊本県ならびに熊本大 学北園芳人教授には貴重な資料のご提供とご助言を頂 きました。ここに感謝申し上げます。また,本研究は 科学研究費補助金基盤研究(C)19510187(研究代表者: 大塚悟)および基盤研究(C)19560503(研究代表者:岩 部司)の補助を受けて行われたことを付記する。

# 参考文献

1) 例えば,村田重之:平成15年7月水俣宝川内土石流災害 調査報告,平成15年7月水俣宝川内土石流調査報告,第13 回熊本自然災害研究会研究発表会要旨集, pp.27-34, 2004.

- 2) 大塚悟,山下良,池本宏文:斜面の浸透特性を考慮した豪 雨時の斜面安定解析法の開発,第2回土砂災害に関するシ ンポジウム論文集, pp.165-170, 2004.
- 3) Soil Plus Flow: 伊藤忠テクノソリューションズ㈱
- 4)大塚悟,宮田善郁,池本宏文,岩部司:剛塑性有限要素法による斜面安定解析,地すべり, Vol.38, No.3, pp.75-83, 2001.
- 5) 大野真希, 小橋秀俊, 古本一司, 伊勢野暁彦, 池田利明: 堤 防の浸透崩壊におけるサクションの影響に関する実験的 検討, 第 39 回地盤工学研究発表会, pp.1257-1258, 2004.
- 6) van Genuchten, M.T. : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am.J, pp.892-898, 1980.
- 7)加藤正司,吉村優治,河合克之,寸田亘:不飽和土の一軸圧 縮試験時の強度特性に及ぼすサクションの影響,土木学 会論文集, No.687, III-56, pp.201-218, 2001.
- 8)水侯市土石流災害検討委員会:水侯市土石流災害検討委員会報告書,2004.
- 9) 千木良雅弘: 『崩壊の場所』, 近未来社, 2007.
- 10) 森山崇, 善功企, 陳光斉, 平松浩三: DDA を用いた水俣市 宝川内集地区における斜面崩壊メカニズムの検討,自然災 害研究協議会西部地区部会報・論文集, 29 号, 2005.
- 11) 国土技術研究センター:河川堤防構造検討の手引き,2002. (2008.5.16 受付)