

## ゲリラ豪雨時における道路斜面安定性評価に関する研究

(プロジェクトリーダー：京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 助教 小山 倫史)

**背景：**近年、梅雨前線や台風、異常気象などによる「ゲリラ豪雨」(局所的かつ短時間に多量に降る雨)に起因する斜面崩壊が数多く発生し、山地斜面に隣接している道路や住宅地域などにおいて多大な被害をもたらしており、道路斜面防災システムの整備が急務である。

**必要性：**ゲリラ豪雨と斜面災害に着目すると、ゲリラ豪雨は、極めて強い短時間雨量変化を有するため、斜面表層部の湿潤履歴によっては、数秒単位のレスポンスで多量の雨水浸透量が発生し、斜面安定性を著しく低下させるだけでなく、表層崩壊等の斜面災害を誘発する。特にゲリラ豪雨の場合、数秒単位の鋭敏な降雨/浸透現象を評価する必要性があり、従来の斜面災害の雨量指標のみでは十分な評価はできないものと推察される。すなわち、豪雨を正確に計測することから、その降雨成分(雨量加速度、降雨波形)と斜面安定性に与える影響を的確に把握する必要がある。そのためには、降雨成分を指標として斜面への雨水浸透メカニズムの解明が重要であり、従来の降雨指標のみによる警戒基準雨量に代わり、斜面の計測・モニタリングによる情報、力学・浸透特性も反映したシステムが必要である。

**目的：**社会的・経済的に影響の大きいゲリラ豪雨による斜面崩壊による災害を監視・予測・低減する技術を確認し、Xバンドレーダーによる降雨量予測など組み合わせ、降雨データのみならず、斜面の雨水浸透特性および力学特性を考慮した統合的な道路斜面防災システムの立ち上げを目的とする。

**内容：**上記の目的に基づいて、大きく2つのWG(WG1:計測, WG2:解析, WG3:評価)に分けて以下の点について検討を行う。

### 《WG1:計測ワーキング》

#### (目的)

1. ゲリラ豪雨時のリアルタイム斜面モニタリングシステムの構築
2. 現場計測・長期斜面モニタリング

#### (検討項目)

- Task 0: 豪雨時における斜面計測・モニタリング手法のレビュー
- Task 1: 新たな計測機器の開発・改良(気象情報取得の高精度化)
- Task 2: サンドカラムを用いた室内降雨試験および模擬斜面を用いた大型降雨実験
- Task 3: 現場斜面モニタリングシステム(自己発電型ワイヤレスシステム、多点計測センサーネットワーク)の構築
- Task 4: 現場計測・長期斜面モニタリング

### 《WG2:解析ワーキング》

#### (目的)

1. ゲリラ豪雨時の雨水浸透挙動・メカニズムの把握および数値解析モデル・手法の構築
2. 斜面安定性評価および崩壊予測シミュレーション

#### (検討項目)

- Task 0: 従来の解析手法の特徴の整理(物性、境界条件など)
- Task 1: 雨水浸透メカニズム解明、応力浸透(一ガス)連成解析手法の開発(サンドカラムを用いた室内降雨試験のシミュレーション)
- Task 2: 模擬斜面を用いた大型降雨実験のシミュレーション
- Task 3: 現場斜面のシミュレーション(斜面安定解析、崩壊予測)

### 《WG3:評価ワーキング》

#### (目的)

1. 斜面点検データ活用法及び対策優先順位付けに関わる意思決定のための評価・分析手法の提案
2. 土砂災害警戒情報の高精度化および道路斜面災害の軽減に向けた判断支援システム(警戒情報運用システム)の構築

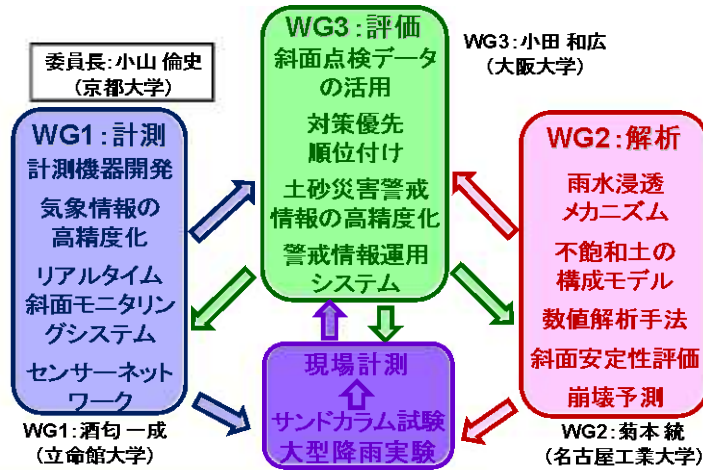
#### (検討項目)

- Task 0: 従来の評価手法のレビュー
- Task 1: 斜面点検データの活用法の提案

Task 2: 土砂災害警戒情報の高精度化・判断支援システムの構築

Task 3: 現場斜面の崩壊シナリオの分析および対策工の提案

本プロジェクトの構成およびスケジュールは以下のとおりである。



		2010年度				2011年度				2012年度			
		4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3	4-6	7-9	10-12	1-3
WG1: 計測	Task 1	[Progress Bar]											
	Task 2	[Progress Bar]											
	Task 3			[Progress Bar]									
	Task 4					[Progress Bar]							
	報告書				[Progress Bar]				[Progress Bar]				[Progress Bar]
WG2: 解析	Task 0	[Progress Bar]											
	Task 1	[Progress Bar]											
	Task 2		[Progress Bar]										
	Task 3			[Progress Bar]									
	報告書				[Progress Bar]				[Progress Bar]				[Progress Bar]
WG3: 評価	Task 0	[Progress Bar]											
	Task 1	[Progress Bar]											
	Task 2		[Progress Bar]										
	Task 3			[Progress Bar]									
	報告書			[Progress Bar]					[Progress Bar]				[Progress Bar]

- 《WG1》  
 Task 0: 豪雨時における斜面計測・モニタリング手法のレビュー  
 Task 1: 新たな計測機器の開発(気象情報取得の高精度化)  
 Task 2: サンドカラム試験及び模擬斜面を用いた大型降雨実験  
 Task 3: 現場斜面モニタリングシステム(自己発電型ワイヤレスシステム、多点計測センサーネットワーク)の構築  
 Task 4: 現場計測・長期斜面モニタリング
- 《WG2》  
 Task 0: 従来の解析手法の特徴の整理(物性、境界条件など)  
 Task 1: 雨水浸透メカニズム解明、応力-浸透(一ガス)連成解析手法の開発(サンドカラム試験のシミュレーション)  
 Task 2: 模擬斜面を用いた大型降雨実験のシミュレーション  
 Task 3: 現場斜面シミュレーション(斜面安定解析、崩壊予測)
- 《WG3》  
 Task 0: 従来の評価手法のレビュー  
 Task 1: 斜面点検データの活用法の提案  
 Task 2: 土砂災害警戒情報の高精度化・判断支援システムの構築  
 Task 3: 現場斜面の崩壊シナリオの分析および対策工の提案
- グレーのハッチ部分は、防災科学技術研究所における斜面を模擬した大型降雨実験の実施予定期間。  
 ただし、震災後の節電対策により、2011年度の実施は不可能となり、2012年度の前半に実施予定

2010年度の成果：

- WG1：ゲリラ豪雨に対する斜面モニタリングシステムを検討するにあたり、既往の技術、現在、開発および適用されつつある計測技術についてまとめ、より効果的なモニタリングシステムを構築する上で必要であると考えられる課題について整理した。特に、ゲリラ豪雨の特徴およびその浸透メカニズムを踏まえたモニタリング手法（リアルタイム雨量計や表面フラックスメーター）の開発を行った。
- WG2：不飽和地盤の浸透・変形連成解析手法のベースとなる不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデルの開発に成功するとともに、次年度以降に豪雨時の道路斜面の浸透・変形・破壊・流動解析を遂行する際に必須となる飽和 - 不飽和浸透流解析の適用性が示した。一次元浸透カラム試験に対して、飽和 - 不飽和地盤の浸透流解析を実施し、ゲリラ豪雨を想定した水理境界条件下での地盤の雨水浸透挙動について議論した。
- WG3：平成 18 年度点検調査の手順と項目や安定度調査表の内容、通常管理業務に関して、文献調査およびヒアリングを実施した。また、自己組織化マップ(SOM)を用いた道路のり面の健全度評価および道路のり面の維持・管理に関わる新たな手法の提案を行い、国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所より提供いただいた点検データを用いてその適用性の検討を行った。

# WG1：ゲリラ豪雨時の道路斜面モニタリングシステム構築のための計測技術

## 1. はじめに

WG1 では、本年度、豪雨時における斜面計測・モニタリング手法のレビュー (Task0) や新たな計測機器の開発・改良 (気象情報取得の高精度化) (Task1) について検討してきた。以下に、調査・検討結果をまとめる。

本報告では、ゲリラ豪雨時の道路法面の管理を行うために必要とされるモニタリング・調査技術の現状についてまとめる。そこで、道路法面を管理する際に計測すべきと考えられる「雨量」、「水分量・地下水水位」、「変形量」、「地質」について、それらの測定技術の現状と課題について以下にまとめる。

## 2. 局地的大雨 (ゲリラ豪雨) とは

積乱雲が発生した際に、短時間に少ない雨が降る場合のことを「にわか雨」という。また、積乱雲がさらに発達し、局地的な短時間の大雨が「局地的大雨」である。通常、積乱雲の寿命は1時間もないくらいであるが、前線や低気圧、地形的要因により、積乱雲が成熟して豪雨を降らした後に新たな積乱雲が次々に発生する場合があります。このときの激しい雨が長時間継続する雨のことを「集中豪雨」と呼んでいる。近年、「ゲリラ豪雨」という言葉が使われるようになってきたが、メディアなどで用いられる造語であり、未だ学問的に明確な定義は無い。気象学分野においては、「言葉のイメージが良くない」、「一般的に「ゲリラ」は予測できないことに対して用いる＝ゲ

リラ豪雨は予測できないと認めることになる」といった理由から、局地的大雨と呼んでいる。しかしながら、水文学分野 (土木分野) においては、局地的大雨の人間社会へ及ぼす影響を考慮し、「人への警告の意味合いから強烈なインパクトを与える」といった理由からあえて、「ゲリラ豪雨」と呼んでいる。

## 3. ゲリラ豪雨に対する計測技術

これまでの気象観測では、主に気象庁の気象レーダや国交省のレーダ雨量計 (Cバンドレーダ) が用いられてきた。これらは、雨雲を観測しているため、正確な雨量を得ようとすると、地上雨量データを用いた補正が必要である。そのため、補正に時間がかかり、数分から数十分の間に多量の雨をもたらすゲリラ豪雨を早期に捉える事が出来ない。そこで、国土交通省は、新たな観測手法として Xバンド MP レーダの導入を試みている。Xバンド MP レーダは、Cバンドレーダよりも観測間隔および情報発表時間が非常に速く、分解能も良くなっている。MP レーダとは、マルチパラメータのことで、受信電力値以外も観測可能なレーダのことで偏波レーダと呼ばれている。降雨量を推定するためには、受信電力値に加えて雨粒群の粒径分布情報が必要であり、従来のレーダでは過去の地上雨量と受信電力の関係から逆推定されてきたが、偏波レーダでは水平偏波と鉛直偏波を計測することで降水粒子のサイズを推定している。また、新型の偏波レーダでは、降雨帯を電波が通過して減衰しても、影

表 2-1 水分量計測技術の各種手法および計測原理

測定事象	測定手法	測定原理など
サクション	① テンシオメータ法	セラミック製ポーラスカップを介し、土中水の圧力と平衡したテンシオメータ内の脱気水の圧力を計測。測定範囲: 大気圧と間隙水圧の差を測定しているため、測定限界は約-100kPa。
	② サイクロメータ法	・熱電対の特性を用い、相対湿度を測定し、土の水ポテンシャルを直接計測。 ・ケルビン式から全ポテンシャル(kPa)と水蒸気の相対湿度(%)の関係式を得る。 ・測定範囲: 約-100kPa～-100MPaのトータルサクション
	③ 熱散逸法	・熱伝導率と土中水のマトリックポテンシャルが-10kPaよりも乾燥した範囲で線形関係であることを利用。 ・熱源と温度センサーを多孔質セラミックブロック内に組み込み、熱パルス発生前後の温度差を計測。測定範囲: 約-0.01MPa～-100MPaのマトリックサクション。
含水量 土壌水分量	① 電気抵抗法	土の電気抵抗を測定し、水分量を計測。
	2極法	・電極付き多孔質ブロックを埋設し、ブロックの吸湿水分と土中水分の平衡時における電極間の電気抵抗を測定。校正式として、電気抵抗、温度、体積含水率の関係式が必要。
	4極法	・電極を土中に直接挿入し、電極間の電位差を測定することにより土中の比抵抗を求め、水分量を測定。塩分濃度が変化しないことが前提条件。
	② 誘電率を用いた手法	比誘電率と体積含水率の関係に基づく計測手法
	静電容量法	・電圧を測定し、水分量を求める。予め、土の水分保持状態に対応した比誘電率から静電容量、周波数を求める。周波数を電圧に変換する電子回路を用いて、測定電圧と含水量の関係を得る。
	時間領域反射率測定法 (TDR法)	・一定周波数 (30MHz～3GHzの高周波) の電磁波が土中に埋設したロッドを往復する速度を時間領域で測定し、比誘電率を求める方法。校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
	周波数領域反射率測定法 (FDR法)	・連続的な種々の周波数 (100MHz～1.7GHz) の電磁波が土中のロッド部分で往復時に発生する合成干渉波を周波数領域で測定し、そのピーク特性から、比誘電率を求める方法。校正式が必要。
	振幅領域反射率測定法 (ADR法)	・一定周波数の電磁波 (100MHz) が土中のロッド部分を往復するときに発生する電圧差を振幅領域で測定し、比誘電率を求める方法。校正式として、比誘電率と体積含水率の関係が必要。
	③ 中性子散乱法	・中性子の水素原子による減速効果を利用して、土中の水分量を測定。校正式として、対象土に対する中性子の係数比と体積含水率の関係が必要。
	④ ガンマ線を用いた方法	・ガンマ線の土を透過する際に測定領域の密度が高いほど透過率が減少する性質を用いた方法。校正式として、相対透過率と湿潤密度の校正式が必要。
⑤ 地中レーダ法	・送信アンテナから地盤内に発射した電磁波が反射して受信アンテナに戻るまでの伝播時間を計測。 ・地盤内の比誘電率が異なる境界面 (地下水面など) を推定評価する方法。電磁波伝播速度と比誘電率の関係式から体積含水率も求まる。	
⑥ 熱伝導率を用いた方法	・気相の熱伝導率が、液相や固相の熱伝導率よりもはるかに小さいという性質を用いた方法。 ・校正式として、含水量と熱伝導率の関係が必要。同一の土で、土中温度変化が小さい場合に適用。	

表 2-2 地下水水位測定技術に関する計測手法および計測原理

計測方式	計測原理	
地下水面を直接検知する方法	水面の位置をフロートや触針によって直接検知。	
触針式	観測孔に挿入した検出器が地下水面に到達し、地表面のアース棒と電気的に短絡することによって検出。	
フロート式	水面の変化に応じて水面に浮かんだフロートが昇降し、ワイヤを介して測定器に水位変化が計測される。	
水圧から検知する方法	水頭の変化を電気式圧力計で計測する方法	
ひずみゲージ式	ダイヤフラムに生じるひずみまたは変位を電気抵抗の変化として検知。経年変化の可能性はある。	
差動トランス式	ダイヤフラムに生じた変位により発生するインダクタンスの変化を検出。経年変化が生じない。	
振動弦式	ダイヤフラムに生じた変位を振動弦の張力に変換し、ワイヤの固有振動数の変化として検出。	
半導体ゲージ	圧力が作用すると電気信号が変化する圧力素子を用いており、高感度でヒステリシスが低い。	
光ファイバ	FBG	ひずみ発生時の反射光の波長の変化を検知。分解能が高く、受感部が小さい。温度依存性がある。
	SOFO	反射光を干渉光として捉え、入射光との光路差が検出され、変位量が計測される。温度依存がない。
	BOTDR	Brillouin散乱光のひずみの変化に比例して周波数が変化する特性を用いたもの。長距離、多点での計測が可能。

響が少ない手法を採用している。

本研究プロジェクトでは、ゲリラ豪雨に対応した計測技術として、超音波センサやレーザ変位計を用いたリアルタイム雨量計、雨水の地表面流出量を計測するための表面フラックスメータや雨滴径を計測するための雨滴径計測装置の原理について紹介している。

## 4. 水分量・地下水水位の測定技術の現状

### 4.1 水分量の測定技術の現状

表 2-1 に水分量を計測するための手法および計測原理について示す。土中の水分量を測定する機器は、大きくサクションを計測するものと土壌水分量（体積含水率、含水比など）を計測するものに分けられる。より詳細な計測手法、構成機器、特徴などについては、参考文献 1) を参照していただきたい。

水分量計測技術として、テンシオメータ法、誘電率を用いた手法（TDR、ADR 法など）が自然斜面および道路法面、鉄道盛土、河川堤防などの人工斜面において用いられ、サクションおよび土壌水分量の長期現地計測が行われてきており、雨量計、水位計や地表面変位計などの計測結果と合わせて、降雨時の斜面の安定性との関係について考察がなされてきている。

斜面崩壊の予知や警戒に対する適用実績については、現状では、サクションや土壌水分量の計測結果のみで予知や警戒を行うまでの成果は得られておらず、降雨量や変位量などと組み合わせることが必要である。また、計測結果と数値シミュレーションを組み合わせた斜面崩壊予知システムが提案されている。

### 4.2 地下水水位の測定技術の現状

地下水水位の測定技術の計測方式および測定原理などを表 2-2 に示す。より詳細な計測手法、構成機器、特徴などについては、参考文献 2) を参照していただきたい。

これまでにひずみゲージ式間隙水圧計を用いた室内・現地実験が行われてきており、降雨および斜面崩壊時における水圧の挙動について研究され、水圧計による崩壊予知の有効性は認められるものの有効な設置位置、機器の精度、長期安定性の問題が挙げられている。

近年、光ファイバを用いた水位計・水圧計やケーブルレスの水圧計が開発されており、現地での検証試験が実施されている。

本研究プロジェクトでは、土中水分と地下水水位をひとつのセンサで計測可能な超音波計測器や土中の間隙空気圧を計測する手法および間隙空気圧と浸透挙動の関係についてまとめた。

表 2-3 変位量計測技術に関する計測原理および特性

計測機器名	計測方式	計測原理	特性		
傾斜計	気泡式	電解溶液中の気泡の移動による液面変化を静電容量変化として捉える。	・作動範囲: 2軸 ± 20°、分解能: 0.01° ・高精度で安定性が良い。		
	振り子型	振り子の原理を用いて、地表面に変動に伴う振り子の傾斜角を測定。	・作動範囲: ± 15~300分、精度: ± 1%FS ・温度特性: -10~+40℃		
	地中傾斜計	挿入型	ボーリング孔内に設置したケーシングの傾きを深度方向に欠乏なく等間隔で傾斜測定し、水平変位量を求める。	・ひずみゲージ式などで、分解能は 0.1%FS。 ・サーボアクチュエータ式の分解能は 0.001%FS。	
設置型		ボーリング孔に埋設固定するタイプ。電解液式、加速度式、磁気抵抗式がある。	・雷による破壊を注意。 ・温度の影響が大。		
光ファイバセンサ	OTDR方式	レーザ後方散乱光強度を測定し、変位・変状や発生位置を計測。	・分解能: 0.2dB、計測範囲: 36dB、 ・計測時間: 約5分、温度範囲: -10~40℃		
	BOTDR方式	ブリルアン後方散乱光の周波数変化により、変位・歪みの測定。	・分解能: 0.1mm/m、測定範囲: 2%、 ・計測時間: 5~10分、温度範囲: -10~50℃		
	FBG方式	センサ部での反射光(Bragg波長)の波長変化から歪みを測定。	・分解能: ± 0.004mm/m、測定範囲: 300mm、 ・計測時間: 最小2秒、温度範囲 5~50℃		
	MDM方式	光ファイバの変状(曲げ)による漏光に伴う透過光の強度低下の特性から、透過光強度を測定し、変位測定を行う。	・分解能: 0.2mm/2~10m、測定範囲: 0~100mm、 ・計測時間: 秒単位の変化に対応、温度範囲: -10~50℃		
GPS	単独測位	・約24個の人工衛星から発信される搬送波による測位システム(カーナビなど)。	・測位精度: 数m~数十m、観測時間: リアルタイム~		
	相対測位	DGPS	・複数の観測局で同時観測を行うことで相対位置を算出。	・測位精度: 約1m、観測時間: リアルタイム~	
		干渉測位	スタティック法・短絡スタティック法	・搬送波を用いる干渉測位で、未知点が観測中静止している方法。	・測位精度: 数mm~数cm、観測時間: 数十分~1日
		キネマティック法	・搬送波を用いる干渉測位で、未知点が観測中移動している方法。	・測位精度: 数cm~数十cm、観測時間: リアルタイム~	
		RTK法	・搬送波を用いる干渉測位で、移動観測と同時に位置を決定する方法。	・測位精度: 数cm~数十cm、観測時間: リアルタイム~	
リモートセンシング	・観測センサとプラットフォーム(Landsatなど)から構成される人工衛星による地表面観測手法	・衛星の周期性から、同じ地表面をある一定の周期で計測可能。 ・一度の計測で広範囲の測定が可能(Landsat: 185km)。 ・広域の測定を数秒間で行える。			
Acoustic Emission	・固体材料内部の微小な破壊あるいは同様のエネルギー開放過程によって発生する弾性波現象(AE)を計測する手法	・斜面モニタリングに用いるため、AE信号を改良b値、正規偏差、波形記録・判読により評価する手法が提案されている。			

## 5. 変形量の測定技術

変形量の測定技術として、傾斜計、光ファイバセンサ GPS 測位技術、リモートセンシング、Acoustic Emission (AE)が挙げられる。それぞれの測定原理や特徴を表 2-2 に示す。より詳細な計測手法、構成機器、特徴などについては、参考文献3)を参照していただきたい。

傾斜計は、これまでに多くの斜面において使用されている。斜変動と降雨パターンとの関係については、これまでに検討されているが、降雨に伴う変動を示すデータや論文は数が少ないのが現状である。

近年、各種観測への応用が進められている新技術の一つである光ファイバセンサは、斜面、道路構造物、河川堤防のモニタリングなど、主に長い線状の対象範囲を観測する手法として開発が進められている。絶縁性、耐久性に優れ、また、国道などに敷設されている光ファイバケーブルとの接続により、計測データの展開が容易に可能であるという特徴を持っている。これまでに複数の斜面に設置されており、半年ないし月単位で発生する微小変位の蓄積、降雨時の斜面崩壊を捉えた計測データが数箇所の斜面で得られ、降雨量とひずみ量やひずみ速度の関係、温度等に起因して発生する日常変化の影響の棄却方法などについて考察されてきている。

GPS においては、斜面崩壊や地すべりなど工学的解釈のために高い計測精度が求められる場合においては、スタティック方式による時系列データを統計処理することで、客観的な判断が下せるようになってきている。計算環境や設置方法にもよるが、2~3mm 程度の突発的な微小変位も時系列統計解析で検出可能となってきている。

リモートセンシングでは、衛星データの分類処理、地盤主題図の作成を行い、それらのデータをもとに数量化分析を行い、危険度予測画像を作成する手法が提案されてきている。

AE 技術を斜面分野に適用するために、岩盤斜面、土砂斜面、しらす斜面に AE 計測システムが設置されており、この結果、AE による斜面の変状を詳細に捉える可能性があることが確認され、AE 法による斜面動態計測方法についてまとめられてきている。

本研究プロジェクトでは、光るセンサや 3D スキャナによる斜面の変位計測について紹介した。

## 6. 斜面地質調査技術

道路斜面の健全性評価に適した物理探査手法についてまとめた。評価項目としては、①吹付け背面の土砂化や空洞、亀裂などの劣化状況、②速度層区分、強度区分、③地質構造(流れ盤)、④風化の程度、⑤断層(低速度帯)、⑥居土・変形特性、⑦地下水変化などを想定した。今回は、熱赤外線映像法、弾性波探査、地中レーダ探査、電気・電磁気探査の特徴や適用範囲についてまとめた。より精度の良い結果を得るためには、ポーリング探査などの先験情報を合わせて検討することが重要である。また、

長期的にデータを収集するために、機器の強度、電力供給問題、データの膨大化への対処が必要とされている。これからの物理探査としては、複数の手法を組み合わせた複合探査による地盤の状況の解釈が重要となってくると思われる。

また、斜面内の強度を調査するための改良型スウェーデン式サウンディング(NSWS)試験について、その機構と適用例を示した。

## 7. 斜面モニタリングシステムの構築

斜面モニタリングシステムの設置事例として、熊本県水俣市の土砂災害、兵庫県神戸市、室内大型土槽試験、文化財後背斜面における事例を紹介した。また、設置の容易化や多点計測を目指した、ワイヤレスネットワークシステムを利用したモニタリングシステムを紹介した。通信の安定性や電力問題など解決すべき問題がまだ多いが、今後、ますます利用される事例が増えると思われる。さらに、対策工法のセンサ化を目指した事例について紹介した。これは、ハードとソフトを融合させることで、ある程度の変形は許容しながら、斜面をモニタリングしていくことで人々の安全を守ることを目指したものである。斜面モニタリングシステムを設置する際には、どのような崩壊タイプ(土石流、地すべり、表層崩壊)に対するシステムを構築するかをよく検討し、最適な計測機器やシステムの選定が重要である。

## 8. まとめ

今年度のプロジェクトでは、ゲリラ豪雨に対する斜面モニタリングシステムを検討するにあたり、既往の技術、現在、開発および適用されつつある技術についてまとめた。最後に、より効果的なモニタリングシステムを構築する上で必要であると考えられる課題について以下に示す<sup>4)</sup>。

- (1) 設置箇所の選定： 斜面をモニタリングするに当たり、一番の問題はどの斜面に設置するか、線的・面的にセンサを設置する場合、どこまでの調査が必要かである。よって、表層崩壊の場合には、「どこから」の「どの程度」の規模の崩壊を対象とするのかを考えて設置する必要があり、技術者にその判断が求められる。
- (2) 運用・判断方法： 斜面管理者は、どの状態であれば対策するのか、モニタリングを継続するのか判断しなければならない。また、モニタリングを継続する場合には、道路管理であれば事前通行規制の雨量のように、変状状況に応じた管理体制とリンクしたものとしなければならない。特に、事前通行規制区間外でモニタリングを行う場合には、雨量の判断指標がないため、変状の状況のみから何らかの判断をすることが必要となる。このため、適切な運用方法を構築する必要がある。
- (3) コスト低減： 様々なモニタリングシステムが開発されており、計測する対象に応じて、いろいろなシステ

ムを選択できるようになっているが、モニタリングは対策と異なり崩壊というリスクが残存しており、将来対策を行う可能性も考慮して、出来る限り低コストが望まれる。また、斜面崩壊モニタリングにおける計測対象は、変位、傾斜、温度、雨量、水位、土壌水分量、間隙水圧など状況に応じて複数選択することになる。新たな計測対象を追加することで、別途システム構築が必要となるのであれば、不経済である。原理上難しいものもあるが、同一システムで管理できるような技術開発も望まれる。

#### 参 考 文 献

- 1) 井上光広：不飽和地盤の挙動と評価 (2.1.2 サクシオン・水分の計測)，(社)地盤工学会，pp.14-25，2004.
- 2) 樋口佳意：降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究報告書 (3.3 地下水の計測技術)，(社)地盤工学会，pp.46～50，2006.
- 3) 中澤広行，小橋秀俊，山下祐一，島重章，大河原彰：降雨時の斜面モニタリング技術とリアルタイム崩壊予測に関する研究報告書，(3.2 変形量の計測技術)，(社)地盤工学会，pp.26～45，2006.
- 4) 小橋秀俊，酒匂一成：各種機器による斜面モニタリング技術の現状，土と基礎，論文，Vol.55，No.9，Ser. No.596，pp.7-10，2007.

## WG 2 : ゲリラ豪雨時の斜面崩壊に関する室内試験と数値解析

解析ワーキングでは、崩壊機構・形態の把握、崩壊原因の解明や被害予測法の高度化、防災対策法の合理化を目指して、要素試験やモデル実験を組み合わせた検討を行い、多様な観点から実現象を観察し、実測値を収集するとともに、土粒子と間隙の水および空気三相系からなる不飽和地盤の雨水浸透特性、浸水変形・破壊特性、破壊後の流動特性に対して様々な解析手法を駆使して多角的に検討する。本 WG では室内要素試験、一次元浸透カラム試験、大型降雨実験の 3 種類の試験と実際の崩壊事例を対象として数値解析を実施し、解析の妥当性を検証するとともに、豪雨時の斜面の浸透、変形、破壊、流動過程に考察を加える。なお、本年度の主な実施項目は要素試験およびカラム試験とそれらの解析である。

### 3.1 室内要素試験と不飽和土の浸透・変形モデルの開発

要素レベルでの浸水・変形挙動の把握を目的とした要素試験を実施するとともに、不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデルを定式化した。

#### 3.3.1 ヒステリシスと体積変化の影響を考慮した拡張型水分特性曲線モデル

van Genuchten の式は飽和度とサクシジョンの間に一義的な関係を仮定する簡便な水分特性曲線モデルであり、広く用いられている。このような古典的モデルを、サクシジョン履歴だけでなく間隙比の影響も考慮できるように簡単に拡張する方法を提案した。吸水過程と排水過程で異なる経路を辿るヒステリシス特性は、吸水・排水履歴を反映する状態変数として水分履歴パラメータ  $I_w$  を定義し、吸水・排水に対応した発展則を規定すれば的確に記述できることが示された (図 1)。また、間隙比が水分保持特性に及ぼす影響は、一般的な水分特性曲線モデルのサクシジョン  $s$  を間隙比の要因の影響も考慮した修正サクシジョン  $s^*$  に置き換えることで発展型モデルに拡張し、提案モデルは間隙の異なる土の水分特性曲線の違いを統一的に記述できることを示した。

#### 3.3.2 浸水に伴う変形メカニズムと不飽和土の構成モデル

不飽和土の圧密・浸水試験を実施し、飽和度による圧縮特性や浸水時のコラプス現象 (図 2) を観

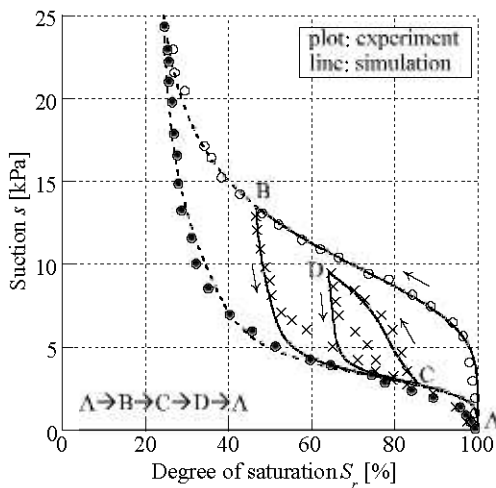


図 1 吸水・排水過程を伴う水分特性曲線と解析

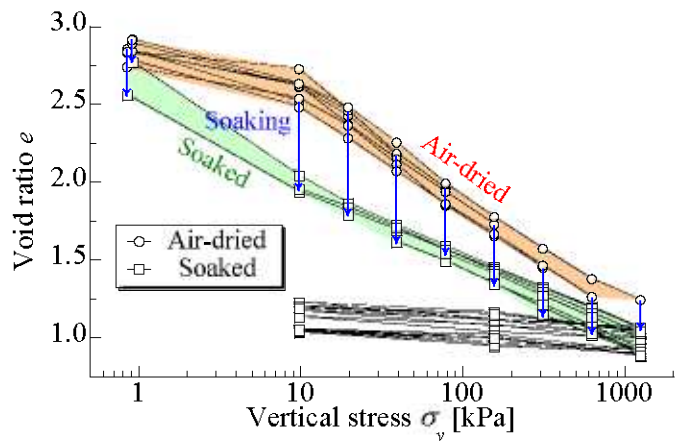


図 2 気乾土試料の圧密・浸水試験

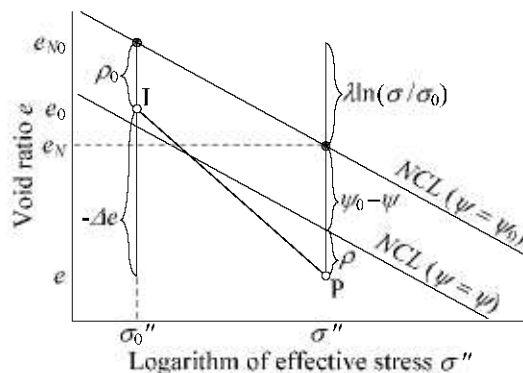


図 3 不飽和土の構成モデル

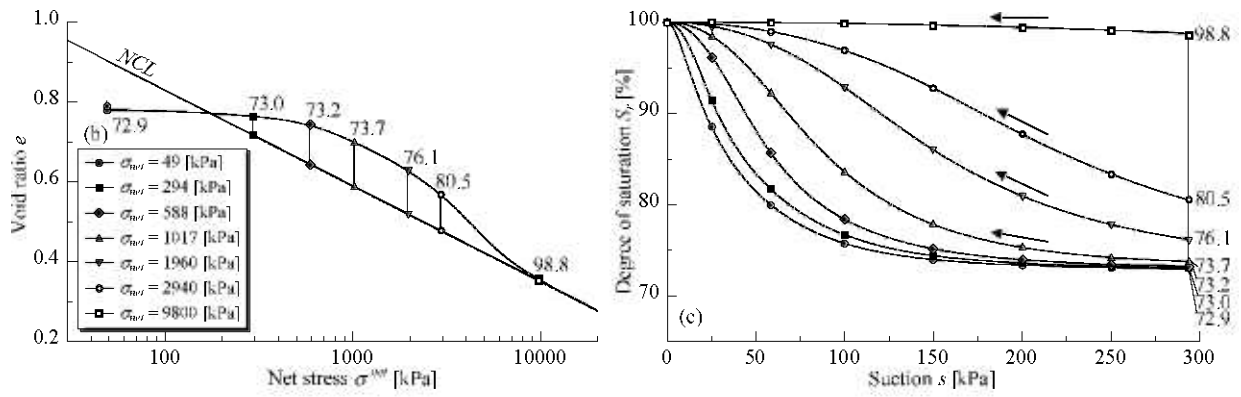


図4 過圧密土の圧密・浸水試験のシミュレーション

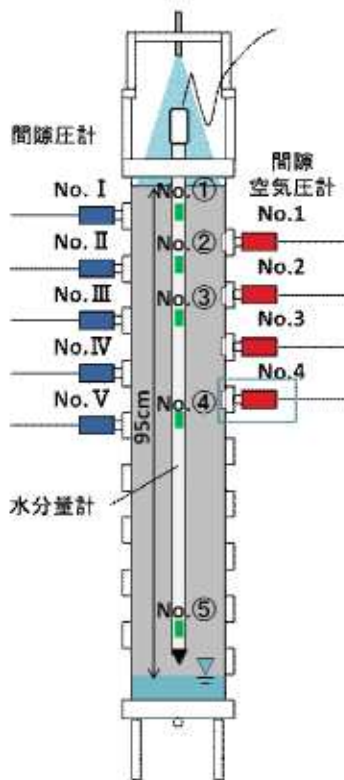


図5 実験装置と計測機器類

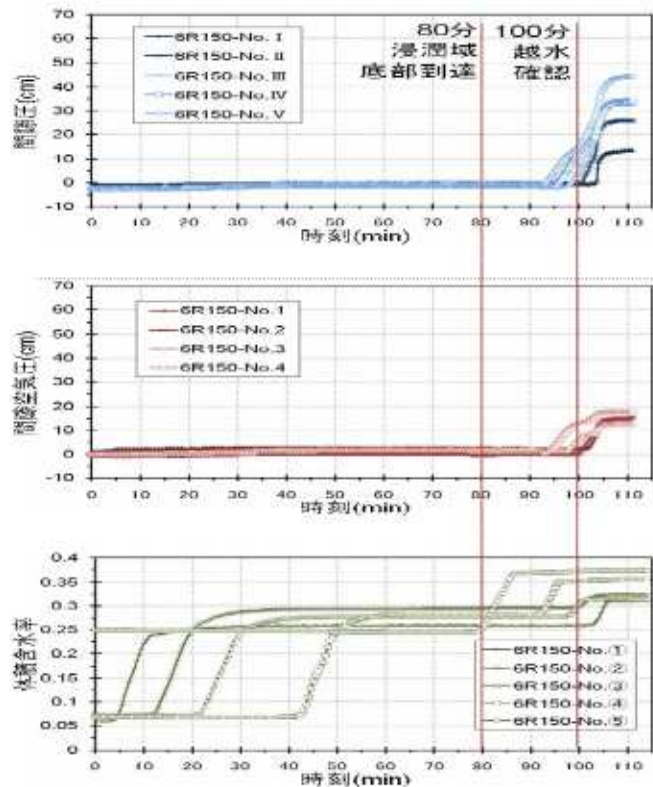


図6 降雨浸透に伴う間隙水・空気の移動と圧力変化

察するとともに、Bishop の有効応力と水分特性曲線モデルおよび正規圧密線の移動を表す状態変数 $\psi$ を用いて不飽和土の構成モデル(図3)を定式化した。一連の解析結果から、提案モデルは飽和度による圧縮性の違いや圧縮に伴う飽和度の増加、浸水に伴う体積圧縮(図4)など不飽和土の典型的な応答を適切に記述できることを示した。

### 3.2 一次元浸透カラム試験と解析

不飽和地盤の一次元雨水浸透現象を雨水浸透カラム試験(図5)により検討した。同実験は、降雨強度、地盤の含水状態、排気・排水条件、雨滴粒径および初期含水比を変化させて実施し、降雨中の地盤内の間隙圧、間隙空気圧および水分量の変化を計測した(図6)。その結果、ゲリラ豪雨を想定した高い降雨強度の場合に間隙空気圧の上昇や地表面での溢流といった特徴的な現象が起こることがわかった。実験に対して実施した飽和・不飽和浸透流解析(図7)は、間隙水の連続式を支配方程式として用い、有限差分法による離散化を行うものであり、間隙空気の上昇を伴わないようなパターンに対しては雨水の浸潤過程など十分な適用性を確認できた。一方、ゲリラ豪雨を想定した高い降雨強度の雨水浸透実験では、間隙空気が封入されて間隙空気圧が増加することが確認されたが、本検討で実施した浸透流解析



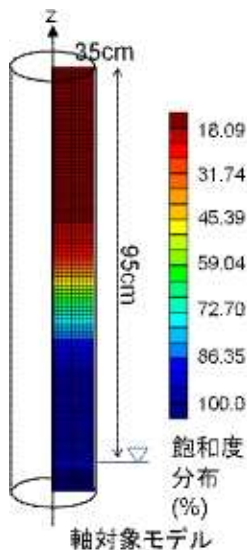


図 3.7 珪砂 6 号  
解析モデル（飽和度分布）

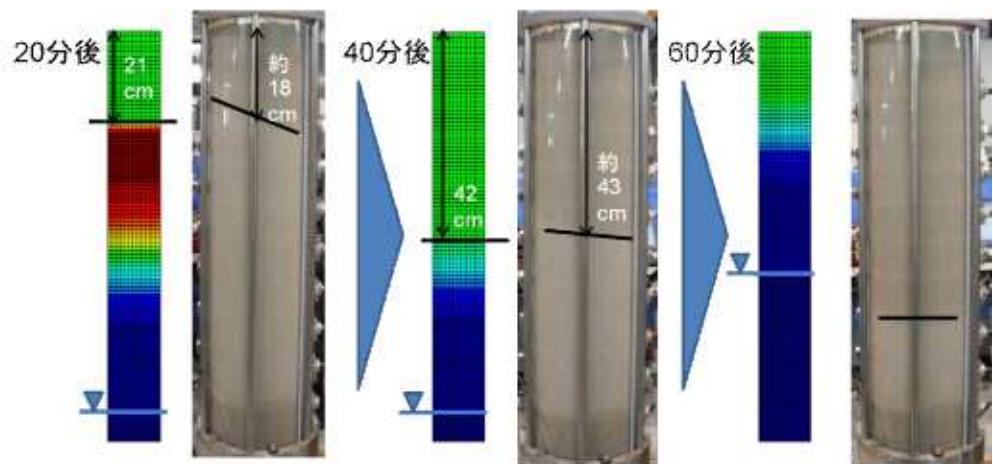


図 3.8 降雨による浸潤域の進展と解析結果の比較

は間隙水の連続式のみを支配方程式として用いていたため、間隙空気の移動や間隙空気圧の変化を解析的に求めることはできなかった。ゲリラ豪雨のような高い降雨強度下での間隙空気圧の増加や間隙空気の封入も含めて、道路斜面の変形・破壊予測を行う場合には、間隙空気の質量保存則も満足する解析を実施する必要がある。

### 3.3 まとめと今後の展望

解析ワーキンググループの目的と実施項目について説明し、本年度の主な成果を示した。実験的検討として、不飽和土の室内要素試験や一次元浸透カラム試験の概要と結果を示した。さらに、室内要素試験や既往研究の知見をベースとして不飽和土の構成モデルおよび水分特性曲線モデルを定式化し、実測データとの比較により提案モデルの妥当性を検証した。一次元浸透カラム試験に対しては、飽和 - 不飽和地盤の浸透流解析を実施し、ゲリラ豪雨を想定した水理境界条件下での地盤の雨水浸透挙動について議論した。本年度の検討では、不飽和地盤の浸透・変形連成解析手法のベースとなる不飽和土の構成モデルと水分特性曲線モデルの開発に成功するとともに、次年度以降に豪雨時の道路斜面の浸透・変形・破壊・流動解析を遂行する際に必須となる飽和 - 不飽和浸透流解析の適用性が示された。次年度は本年度の研究成果を継承・発展した数値解析と、WG2の参加各グループが鋭意開発を進めている力学モデルや数値解析コード（本年度の報告書では紹介していない）により新たな知見が得られるものと大いに期待される。

# 評価ワーキング（WG3）の報告（要約版）

## 4.1 評価ワーキングのタスク

本年度の評価ワーキングに課せられた課題は下記の通りである。

Task 0: 従来の評価手法のレビュー

Task 1: 斜面点検データの活用法の提案

Task 2: 土砂災害警戒情報の高精度化・判断支援システムの構築（平成 22 年度から平成 23 年度）

報告における内容と評価ワーキングに課せられた課題との対応関係は以下の通りである。

### 4.1 概要

#### 4.2 斜面の防災点検の現況

4.2.1 平成 18 年度防災点検要領の概要 Task 0

4.2.2 切土斜面の管理事例 Task 0

#### 4.3 自己組織化マップによる解析と結果の活用

4.3.1 道路法面維持・管理における SOM の活用 Task1&Task2

4.3.2 点検対象外・対策不要箇所斜面防災に対する SOM の活用 Task1

#### 4.4 まとめ

## 4.2 Task0:従来の評価手法のレビュー

### 4.2.1 平成 18 年度防災点検要領の概要

ここでの目的は、解析・分析に使用できる管理データの種類や特徴、また、通常管理業務に関する情報収集である。そのため、平成 18 年度点検調査の手順と項目や安定度調査表の内容、通常管理業務に関して、文献調査と国土交通省近畿地方整備局福知山河川国道事務所におけるヒアリングを行った。

### 4.2.2 切土斜面の管理事例

山陽道における切土法面管理事例、旧日本道路公団関西支社管内のり面防災に関する検討事例、JR における斜面管理・運転規制管理に関する情報収集を行った。そして、法面管理に関する新たな知見を得ることが出来た。

## 4.3 Task 1: 斜面点検データの活用法の提案

### 4.3.1 道路法面維持・管理における SOM の活用

この研究の目的のうち、Task 1 に関わるものは下記の通りである。

- ① SOM による道路のり面のクラスタリングとのり面の変状あるいは安定性に大きな影響を及ぼすと考えられる要因の抽出
- ② クラスタリングを明確にする入力ベクトル成分（項目）の補足追加
- ③ 履歴データを用いた SOM によるマップの作成

研究・検討の結果、以下の知見を得た

- ① 安定度調査表の点検項目をもとに SOM による道路のり面のクラスタリングが可

能である。

- ② 過去に、被災したのり面を危険度・健全性評価の基準とすることにより、類似した被害が生じる可能性があるのり面（災害未経験）を選び出すことができる。
- ③ 被災したのり面のクラスタは「崩壊跡地」および「当該のり面の変状」の影響を強く受けているものと「崖錐地形」、「崩壊跡地」、「オーバーハング」、「表土及び浮石・転石の状況」、「当該のり面の変状」、「隣接するのり面・斜面等の変状」の影響を強く受けているものの2つが挙げられる。
- ④ 「崩壊跡地」および「表土及び浮石・転石の状況」は、危険度の高いのり面を抽出する際の重要な点検項目であるといえる。
- ⑤ 地域ごとの気象条件は、のり面のクラスタリングを明瞭にする項目である。
- ⑥ 安定度調査表で重要度の高い点検項目と、実際の被災箇所に影響の大きい要因にはずれが生じている可能性があると考えられる。

#### 4.3.2 点検対象外・対策不要箇所の斜面防災に対する SOM の活用

この研究の目的は、新たな点検項目を追加し、点検対象外箇所と対策不要箇所における危険のり面の抽出方法を検討することである。本年度の検討から以下の知見を得た。

- ① 「風化」、「崩積土」は道路斜面の崩壊に大きく影響している可能性が高い。
- ② 「風化」と「断層・リニアメント」の両方を有する道路斜面のほとんどが崩壊履歴を有している。
- ③ 防災カルテ及び電子台帳付図だけでは十分な道路斜面に関する情報が得難い。
- ④ 防災カルテを点検の記述だけでなく、点検を項目化する方が良いと考えられる。

### 4.4 Task 2: 斜面点検データの活用法の提案

#### 4.4.1 土砂災害警戒情報の高精度化・判断支援システムの構築

この研究の目的のうち、Task 2 に関わるものは下記の通りである。

- ① クラスタリングされた道路法面に対する対策の優先順位付けへの活用の試み
- ② 履歴データを使って作成したマップによる健全性評価方法の提案。

研究・検討の結果、以下の知見を得た。

- ① 同じクラスタ内に含まれるのり面は、同じような災害が生じることが多いことから、対策工の選定支援を行うことが出来る。
- ② 点検調査の履歴データを用いることにより、のり面の経年劣化を評価できる可能性があることを示唆した。