

## 河川砂防技術研究開発 【成果概要】

<b>①研究代表者</b>		氏 名 (ふりがな)	所 属	役 職	
		笹原克夫 (ささはらかつお)		高知大学教育研究部自然 科学系農学部門	教授
<b>②研究 テーマ</b>	名称	土壌水分と地表面変位の同時計測に基づく斜面崩壊発生予測手法の 開発			
	政策 領域	[分野] 地域課題分野 (砂防)	融合 技術	(リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等)	
		[公募課題]			
<b>③研究経費</b> (単位: 万円)		平成26年度	平成27年度	平成28年度	総 合 計
※端数切り捨て。		171	162	163	497
<b>④研究者氏名</b>					
氏 名		所属・役職 (※平成 年3月31日現在)			
<b>⑤研究の目的・目標</b>					
<p>土砂災害防止法に定められる土砂災害警戒区域に指定されると、市町村長には「警戒避難体制の整備」が義務付けられる。このためにはモニタリングに基づく土砂災害発生予測が有効な方法であると考えられるが、計測データに基づき土砂災害の発生を予測するソフト面の技術が進んでいない。本研究ではこれを解決するために、降雨条件下における斜面内の土壌水分と変形の計測に基づく、個別斜面の崩壊発生予測手法を確立する。</p> <p>まず降雨による表層崩壊に焦点を当て、個別斜面における表層崩壊発生の時刻と規模を、斜面中の土壌水分と変形のモニタリングに基づいて、リアルタイムで予測するための、簡易で実務的な崩壊発生時刻の予測手法を提案する。次に斜面上の多数の点に安価な地表面変位計測センサーを設置し、その計測からすべり面の形状や深さを推定する方法も検討する。これにより崩壊発生時刻のみならず、崩壊範囲や規模の予測も可能になる。</p>					

## ⑥研究成果

### 1. まさ土斜面での降雨浸透とそれに伴う斜面変形の計測

#### 1.1 観測の概要

広島県廿日市市宮内試験地に設置した土壌水分センサー、テンシオメーター、地下水位計と傾斜計を用いて降雨浸透過程とそれに伴う斜面のせん断変形の計測を、平成24年から平成28年の5年間、4月～11月の間に実施した。その結果を用いて斜面内の土壌水分量増加と斜面のせん断変形の関係について検討した。

#### 1.2 降雨浸透に伴う土壌水分量の増加と斜面内のせん断変形

上記の観測結果をもとに、降雨イベント毎に、斜面内の同一位置で計測された体積含水率の増加とせん断ひずみの増加の関係を図-1に示す。両者の間には線形関係が認められ、かつ初期の体積含水率が高いほど、両者の線形関係を表す線分の傾きが大きくなる。つまり体積含水率の増加に対するせん断ひずみ増加量が大きくなる。

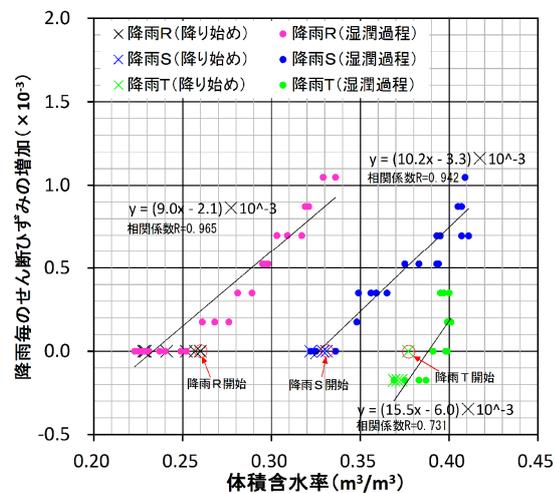


図-1 降雨中の体積含水率とせん断ひずみ増加量の関係

### 2. まさ土斜面における降雨浸透過程の再現方法の検討

降雨による斜面崩壊発生予測を行うためには、降雨の斜面内への浸透と地下水位上昇過程を精度良く再現する必要がある。そのためには飽和不飽和浸透流解析を用いることが一般的であるが、解析精度を向上させるためには、体積含水率と土壌水分吸引水頭の関係である土壌水分特性と、体積含水率ないしは土壌水分吸引水頭と不飽和透水係数の関係である不飽和透水特性の同定精度を高める必要がある。本研究においては、現地斜面において同深度に設置された土壌水分センサーとテンシオメーターの計測データを用いて、土壌水分特性を表すvan Genuchten式<sup>1)</sup>のモデル定数をSCE-UA法<sup>2)</sup>という最適化手法により同定する手法を検討した。

対象の計測データは上記1.でも説明した広島県宮内地区の深さGL-30cmおよびGL-50cmの体積含水率及び土壌水分吸引水頭である。両者の計測データから、同一時刻で体積含水率が増加し、かつ土壌水分吸引水頭が減少する吸水過程のデータのみを抽出した。別途検討により、降雨強度が大きいために、体積含水率増加速度が $0.0001\text{cm}^3/\text{cm}^3/\text{分}$ より大きな場合は、テンシオメーターによる土壌水分吸引水頭の計測に時間遅れが出ることが判明しているため、体積含水率増加速度がその値以下のデータのみを抽出した。この抽出された体積含水率と土壌水分吸引水頭の時系列データを用いて、体積含水率と土壌水分吸引水頭の関係を作成し、van Genuchten式<sup>1)</sup>のモデル定数をSCE-UA法<sup>2)</sup>により同定した。

上記の様に定めたvan Genuchten式を用いて鉛直一次元飽和不飽和浸透流解析を実施すると、深さGL-30cmにおいては降雨イベント中の体積含水率及び土壌水分吸引水頭の時間変化が比較的良く再現されたが、深さGL-50cmでは特に土壌水分吸引水頭の再現性が良くなかった。他の検討も合わせて考えると、土槽の浅い位置での体積含水率と土壌水分吸引水頭の経時変化は比較的良く再現されたが、深くなるに連れてそれらの再現性が悪くなることが判明した。

#### 参考文献

- 1) van Genuchten, M: *Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model*, Research Report, No. 78-WR-08, Princeton Univ., 1978.
- 2) 杉原成満, 福田慎哉, 倉本和正, 荒木義則, 朝居孝二, 古川浩平: SCE-UA法を用いたタンクモデルの構築とそれを用いた土砂災害発生危険基準線の設定, 土木学会論文集F6(安全問題), Vol. 67, No. 1, pp. 1-13, 2011.

### 3. 地下水位と地表面変位の同時計測に基づく斜面崩壊発生予測手法

#### 3.1 はじめに

## ⑥研究成果 (つづき)

斜面のモニタリングに基づく斜面崩壊発生時刻の予測手法として、筆者らは地表面変位と地下水位の計測に基づき、地下水位～地表面変位の双曲線関係を用いた崩壊発生時刻の予測手法を提案した<sup>1)</sup>。この方法は降雨の浸透に伴う斜面内の地下水位の増加による斜面の変形と破壊を、モニタリング結果のみから予測するモデルである。今回は上記の方法をより簡略化した崩壊時刻の予測法を提案する。そしてその手法による予測の結果と、変位データを用いる既存の予測手法の結果を比較し、今回提案する予測手法の優位性を検討する。

### 3.2 模型実験とその結果

実験は(国研)防災科学技術研究所の大型降雨実験施設内で砂質土より成る模型斜面を作製し、人工降雨を与えて模型斜面の崩壊まで、斜面内の土壌水分や地下水位、そして斜面の変形を計測した。斜面下端から3mの位置において計測した地表面変位と地下水位のデータを今回の検討に用いる。計測結果を図-2に示す。11,500秒頃から地下水位が急増し、それと共に地表面変位も微増を開始し、その後12,000秒から地表面変位は急増する。12,700秒頃から地下水位は頭打ちとなり、小さな増減を示しながらもほぼ一定とみなせる状態であるが、その間も地表面変位は急増し、14,400秒に崩壊に至った。地表面変位増加には地下水位発生と増加が大きく寄与することを示す結果と考える。

### 3.3 地表面変位と地下水位の計測データを用いた崩壊発生時間の予測法 (GLDIS法)

図-2で示した任意の時点までの地下水位と地表面変位の計測データから、その時点における崩壊発生時刻の予測を以下のように行った (GLDIS法)。

#### (1) 「地下水位～地表面変位」の予測式

任意の時刻までの地下水位と地表面変位の計測値を用いて、双曲線関数を用いた非線形回帰分析により、その時刻における「地下水位～地表面変位」の予測式を導く。なお式中  $ds$ : 地表面変位、 $GWL$ : 地下水位、 $G_{sur}$ : 実験定数、 $GWL_{max}$ : 崩壊時の地下水位 (定数) とする。これにより時々刻々の  $GWL_{max}$  を求める。

$$ds = \frac{1}{G_{sur}} \frac{GWL_{max} \cdot GWL}{GWL_{max} - GWL} \quad (1)$$

図-3が様々な時刻までのデータを用いて作成した予測式の比較である。地表面変位が急増を開始する直前である12,360秒までのデータを用いた場合は、予測された地下水位が実測よりやや低いものの、それ以降の時刻までのデータを用いた場合は、予測された地下水位は良好に実測の地下水位を表すといえる。

#### (2) 「時間～地下水位」の予測式

同様に様々な時刻までの地下水位計測データより、「時間～地下水位」の回帰式も作成した。非線形回帰には以下の式(2)のような対数関数を用いた。式中  $t$ : 時刻、 $a_1$ 、 $a_2$ : 定数、である。

$$GWL = a_1 \cdot \ln(t) - a_2 \quad (2)$$

様々な時刻までのデータを用いて作成した予測式を図-4に表す。早い時刻までのデータを用

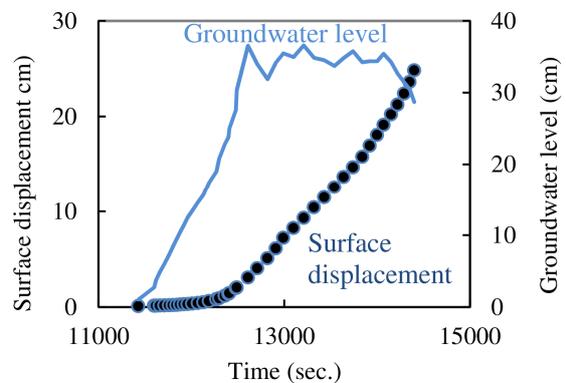


図-2 地表面変位と地下水位の経時変化

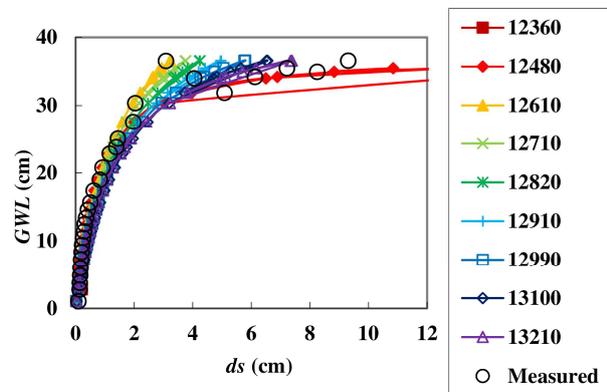


図-3 「地下水位～表面変位」の予測の比較

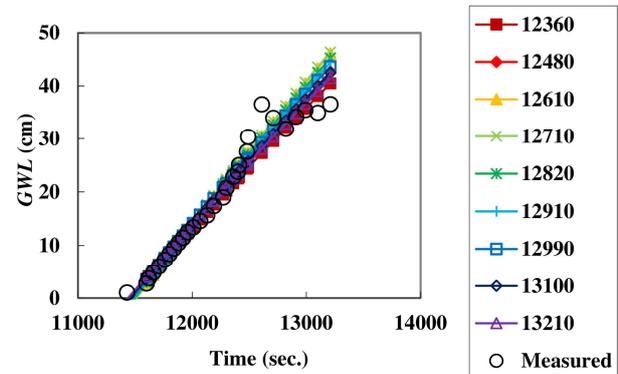


図-4 「時間～地表面変位」の予測の比較

## ⑥研究成果 (つづき)

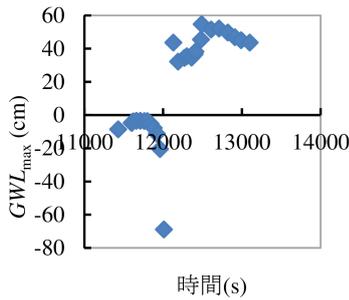


図-5  $GWL_{max}$ の予測結果

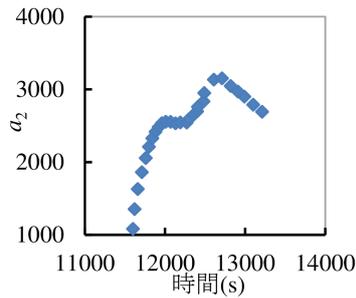


図-6  $a_1$ の予測結果

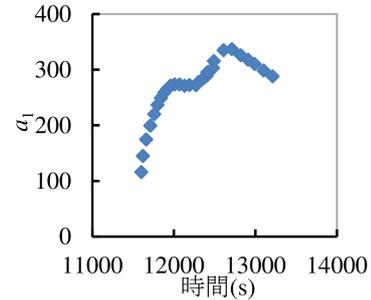


図-7  $a_2$ の予測結果

いた場合でも、遅くまでのデータを用いた場合と同様な回帰式が得られた。

### (3) 上記予測式のモデル定数の経時変化

上記(1)(2)で求めた破壊時の地下水位  $GWL_{max}$ 、「時間～地下水位」の予測式(式(2))中の定数  $a_1, a_2$ の経時変化を図-5、6、7に示す。いずれも12、610秒までは時間と共に増加傾向ではあるものの、値が不安定に増減する。その後いずれも時間と共にほぼ線形に滑らかに減少する。

## 4. GLDIS法による崩壊予想時刻の算出と他の予測法との比較

式(1)の関数形を用いた非線形回帰により求めた  $GWL_{max}$ を、同じ時刻までのデータを用いて求めた「時間～地下水位」予測式(式(2))に代入して  $t$ について解くと、それが「崩壊予想時刻」 $t_r$ となる。このようにして任意の時間までのデータを用いて求めた崩壊予想時刻  $t_r$ と、地表面変位の計測データを用いる既存の方法による予測結果を比較する。既存の方法としては、福囿の精密予測法<sup>3)</sup>と土屋・大村の三点予測法<sup>4)</sup>を用いた。これらはいずれも地表面変位データを用いる方法であり、崩壊発生前の地表面変位速度と変位加速度の間に、両対数軸上で線形関係にある、という実験事実に基づくモデルである。図-8にGLDIS法、精密予測法と三点予測法により求めた「崩壊予想時刻」を比較する。精密予測法は常にほぼ現在の時刻付近を崩壊予想時刻と算出しているため、予測としては意味が無い。三点予測法の結果は非常にばらついており、予測の信頼性が低い。それらに対して、GLDIS法による崩壊予想時刻は、12,000秒までは以上に小さいものの、12,000~12,610秒までは時間経過とほぼ線形に増加し、その後は滑らかに減少する。図-9に3つの方法により求めた崩壊予想時刻  $t_r$ から「崩壊予想時刻  $t_r$  - 現在の時刻  $t$ 」を算出し、それらを示した。これを見るとGLDIS法による  $(t_r - t)$ は、12,610秒からは滑らかに減少していく。崩壊発生時刻に近づくにつれて、崩壊予想時刻が現在の時刻に近づくという意味であり、これは予測としては信頼できる挙動である。

精密予測法は常にほぼ現在の時刻付近を崩壊予想時刻と算出しているため、予測としては意味が無い。三点予測法の結果は非常にばらついており、予測の信頼性が低い。それらに対して、GLDIS法による崩壊予想時刻は、12,000秒までは以上に小さいものの、12,000~12,610秒までは時間経過とほぼ線形に増加し、その後は滑らかに減少する。図-9に3つの方法により求めた崩壊予想時刻  $t_r$ から「崩壊予想時刻  $t_r$  - 現在の時刻  $t$ 」を算出し、それらを示した。これを見るとGLDIS法による  $(t_r - t)$ は、12,610秒からは滑らかに減少していく。崩壊発生時刻に近づくにつれて、崩壊予想時刻が現在の時刻に近づくという意味であり、これは予測としては信頼できる挙動である。

### 参考文献

- 1) 笹原克夫, 酒井直樹: 地盤工学ジャーナル, 9(4), 671-685, 2014. 2) 福囿輝旗: 地すべり, 22(2), 8-13, 1985.  
3) 土屋智, 大村寛: 地すべり, 26(1), 1-8, 1989.

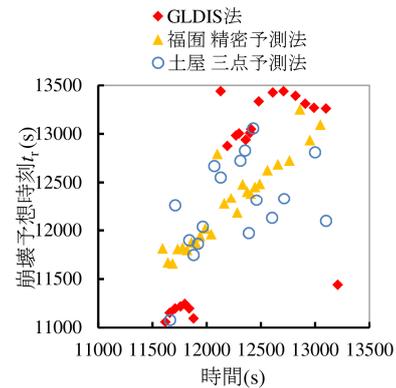


図-8 3つの予測法により求めた崩壊予想時刻の比較

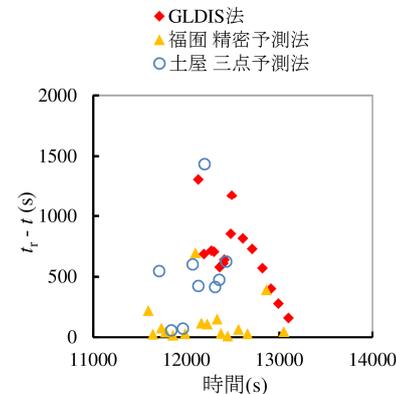


図-9 3つの予測法により求めた「崩壊予想時刻  $t_r$  - 現在の時刻  $t$ 」の比較

## ⑥研究成果 (つづき)

### 5. 多点での地表面変位計測データからすべり面形状を求める手法の開発

#### 5.1 はじめに

切土や盛土などの土工により斜面形状を変更する際には斜面内の応力条件が変化する。この応力変化は直接計測することができないが、斜面上の計測点における多方向の変位を計測することにより、推測できる可能性がある。これは地表面に垂直方向の変位と平行な変位を計測し、それらよりすべり面上の垂直ひずみ増分とせん断ひずみ増分の比であるひずみ増分比（ダイレイタンス）を求め、それを応力の指標とする考え方である。これを検討するために、実大規模模型斜面を作製し、その下部を段階的に掘削する実験を実施し、その間の斜面上の多方向の変位を計測した。また地表面に平行及び垂直な方向の変位を計測し、その結果からすべり面上の垂直及びせん断方向の変位とひずみ増分比を求め、すべり面の傾斜を求めることを試みた。そして多数点において求めたすべり面の傾斜からすべり面の形状を求めることができるかどうかを検討した。

#### 5.2 研究方法

実大模型斜面を作製し、ドラグショベルによる掘削実験を実施した。模型斜面は高さ3.5m、幅4m、勾配30度とし、長さ1.7mの天端を与えた(図-10)。試料は関東ロームを用い、盛土作製直後の含水比は88%、湿潤密度 $0.98\text{ g/cm}^3$ であった。図-10に計器の設置位置を示す。計測機器は地中ひずみ計を4点、傾斜計を12点、変位計を地表面の方向及び地表面に垂直方向に6箇所の計12点、伸縮計を2点設置した。法面下部から4m、斜面高さ

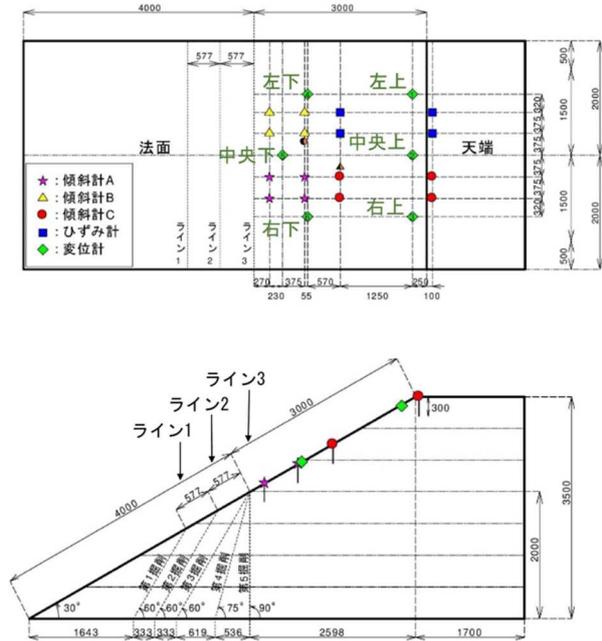


図-10 実大規模模型斜面の平面図と断面図

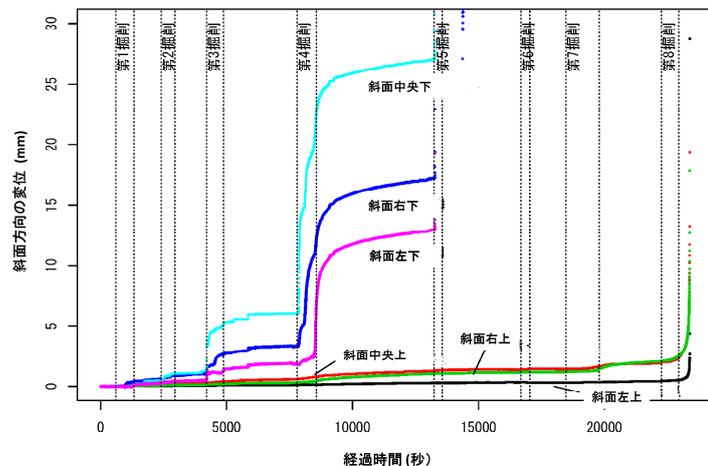


図-11 地表面方向の変位

2m ラインを掘削時の崩壊予想線とし、3段階の掘削ラインを設けた。掘削はライン1から60度(第1掘削)、ライン2から60度(第2掘削)、ライン3から60度(第3掘削)、ライン3から75度(第4掘削)、ライン3から90度(第5掘削)の5回を実施した。なお第5掘削後、斜面法肩から斜面方向2.07m下方で崩壊が発生した。本実験ではさらに崩積土を掘削した場合についても計測を実施し、その後の3段階、計8段階の掘削を実施した。なおドラグショベルのバケット幅が1.8mであったため、1段階の掘削に対し、中央、左、右の3度の掘削を実施した。また各段階の掘削終了から次の掘削段階の開始には最低30分のインターバルを設け、計器に反応がみられた第3掘削と第4掘削間は60分、第4掘削と第5掘削間は90分の間隔を設けた。

#### 5.3 実験結果

実験結果として地表面方向の変位の経時変化を図-11に示す。斜面下方の変位は第3及び4掘削の最中に大きく増加し、その後もクリープ的に増加する。そして第5掘削中に崩壊による急増を示した。斜面上部の変位は第4掘削中から微増を開始し、その後徐々に増加する。そして第8掘削により急増を開始し、第8掘削後クリープ的な変形が加速的に増加し、崩壊に至った。

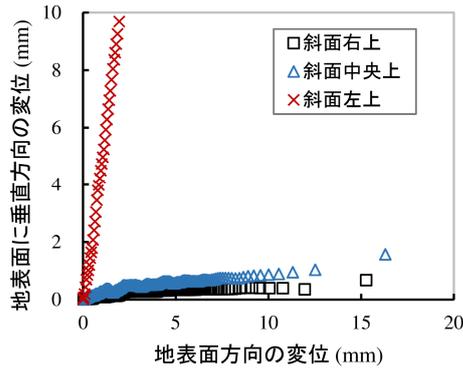


図-12 地表面方向の変位と垂直方向の変位の関係

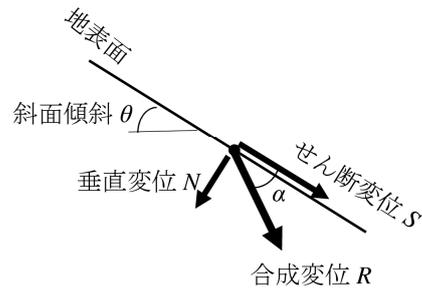


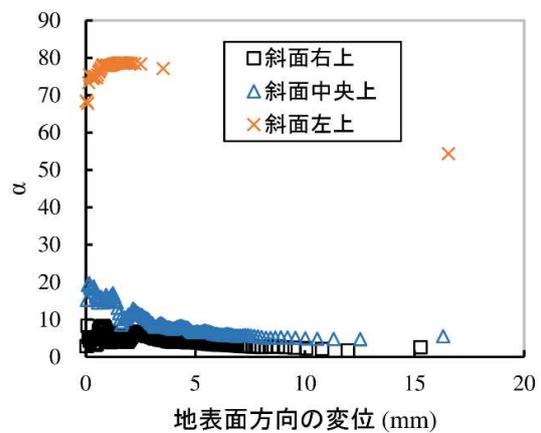
図-13 合成変位の定義

#### 5.4 考察

考察については斜面上部の変位のみを対象とする。図-12に地表面方向の変位とそれに垂直な方向の変位の関係を示す。斜面右上と斜面中央上では地表面方向の変位が増加するに連れて、垂直方向の変位も増加するが、増加量が徐々に減少し、垂直方向の変位が一定値に近づくように見える。それに対して斜面左上では地表面方向の変位の増加に比例してそれに垂直な方向の変位が増加する。

ここで地表面方向の変位とそれに垂直な変位の合成変位を図-13のように定義し、合成変位の方角 $\alpha$ に注目する。図-14に地表面方向の変位の増加に伴う合成変位の方角 $\alpha$ の方角を示す。斜面右上及び中央上では変位増加に伴い $\alpha$ は減少し、やがて一定値をとる。また斜面左上では、変位増加に伴い $\alpha$ は増加して、一定値に至る。つまり合成変位の方角 $\alpha$ は斜面方向の変位の増加と共にその変化量は減少し、斜面の破壊時には一定となる。斜面下部の変位についても同様な関係が得られた。この関係を用いると、斜面の崩壊にどれだけ近い状態であるかを推定することができる可能性がある。

また合成変位の方角 $\alpha$ は地表面に対するすべり面の傾きを表す。図-14からは斜面上部の変位計の計測データからは地表面に対するすべり面の傾きはほぼ0である、つまりすべり面は地表面とほぼ平行であることが推察される。このような地表面上の変位計測点に対するすべり面の傾きが、縦断方向に3点以上計測できるとすべり面の形状が推測できる。今回は斜面上部でしか地表面に対するすべり面の傾き（合成変位の方角 $\alpha$ ）が計測できなかったが、今後縦断方向の3点以上で、2次元方向の変位計測を行うことによって、すべり面の形状を推定することを試みる予定である。



## ⑦研究成果の発表状況

- ・ これまでに発表した代表的な論文
- ・ 著書（教科書、学会妙録、講演要旨は除く）
- ・ 国際会議、学会等における発表状況
- ・ 主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・ 学術誌へ投稿中の論文（掲載が決定しているものに限る）
- ・ 研究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・ 企業とのタイアップ状況
- ・ 特許など、知的財産権の取得状況
- ・ 技術研究開発成果による受賞、表彰等

### (1) 発表論文

- 1) 岩田直樹, 荒木義則, 笹原克夫: 現地計測に基づく降雨に伴うまさ土斜面のせん断変形挙動の評価, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.2, pp.141-151, 2014.
- 2) 笹原克夫, 酒井直樹: 地表面変位と地下水位のモニタリングに基づく斜面崩壊発生予測, 地盤工学ジャーナル, Vol.9, No.4, pp.671-685, 2014.
- 3) 柳崎剛, 岩田直樹, 渡邊聡, 丸岡雄一郎, 梶山敦司, 笹原克夫: 人工降雨実験に基づくまさ土斜面の降雨浸透特性と側方流量の関係の評価, 砂防学会誌, Vol.67, No.5, pp.37-43, 2015.
- 4) 岩田直樹, 中井真司, 片山弘憲, 柳崎剛, 笹原克夫: 平成 26 年 8 月の広島県廿日市市において観測された降雨浸透と斜面の変形, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.4, pp.623-674, 2015.
- 5) 笹原克夫, 石澤友浩: 砂質斜面上の異なる位置における変位と地下水位のモニタリングに基づく表層崩壊発生時刻の予測, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.1, pp.69-83, 2016.
- 6) 中井真司, 渡邊聡, 笹原克夫, 岩田直樹: 降雨時のまさ土斜面表層部におけるせん断変形挙動と土壌水分の関係, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.2, pp.115-125, 2016.
- 7) Katsuo Sasahara: Prediction of the shear deformation of a sandy model slope generated by rainfall based on the shear strain and the pore pressure in the slope, Engineering Geology 224, pp.75-86, 2017.

### (2) 国際会議プロシーディング

- 1) K.Sasahara and T.Ishizawa: Time prediction of an onset of failure in a sandy model slope based on the monitoring of the groundwater level and the surface displacement at different locations, Aversa et al. (eds.) - Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice (PROCEEDINGS OF THE 12<sup>th</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, NAPOLI, ITALY, 12-19, JUNE 2016), CRC Press/Balkema, pp.1791-1798, 2016.
- 2) Katsuo Sasahara: Time-Prediction Method of the Onset of a Rainfall-induced Landslide Based on the Monitoring of Surface Displacement and Groundwater Level in the Slope, H. Hazarika et al. (eds.), Geotechnical Hazards from Large Earthquakes and Heavy Rainfalls, DOI 10.1007/978-4-431-56205-4\_21, Springer, pp.223-233, 2017.

## ⑧研究成果の社会への情報発信

なし

## ⑨表彰、受領歴

なし

## ⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や砂防政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

- ・ 「まさ土斜面での降雨浸透とそれに伴う斜面変形の計測」に関しては、自然斜面の崩壊発生直前の破壊挙動を計測できていない。これは人工降雨により現地斜面を崩壊させ、その間の降雨浸透と斜面変形の計測を行う必要がある。これらの計測データに基づき、今回提案した予測手法の現地斜面への適用性を検討する必要があると考える。
- ・ 「まさ土斜面における降雨浸透過程の再現方法の検討」については、深い位置での降雨浸透過程の再現性を高めるためには、鉛直次元のみならず縦断二次元の浸透モデルが必要である可能性がある。また側方流出が無視できない可能性があるため、降雨量に対する鉛直次元方向と側方への浸透流成分の量を調べる必要がある。
- ・ 「多点での地表面変位データからすべり面形状を求める手法の開発」については、縦断方向に3点以上の変位計測点で同時に崩壊発生までの変位を計測する必要がある。このためのさらなる実験の実施が必要である。

いずれにしても崩壊発生予測手法の検討はかなり進んできた。よって現地斜面での崩壊発生データを用いたそれらの予測手法の検討をおこなうための、人工降雨による現地斜面の崩壊実験が必要であると考えている。

## ①研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、砂防政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

土砂災害防止法に基づく土砂災害警戒区域に指定されると、その区域を対象に市町村長は警戒避難体制の整備の義務を負う。土砂災害に対する避難勧告や指示などの、いわゆる「警報」の発出は、土砂災害の発生時刻の予測に基づいて行われるべきである。このために都道府県砂防部局は「土砂災害警戒情報」とそれを補強するメッシュ情報などの雨量に関する情報を市町村や住民に提供している。市町村単位であればこのような比較的広域を対象にした情報が有効であるが、土砂災害警戒区域は特定の斜面を対象とする広さの区域である。このような場合は降雨のみならず、斜面の特性も反映した崩壊発生時刻の予測が可能になる。このために斜面動態モニタリングが有効であるが、モニタリングにより得た計測データに基づく崩壊発生予測の判定のプロセスが必要になる。本研究はこのプロセスを対象にしている。斜面の土壌水分と変形の計測データのみに基づく、リアルタイムの崩壊発生時刻の予測を、簡便に行うための方法である。

つまり土砂災害警戒区域のような、限定された斜面を対象とした崩壊発生予測に有効な方法であり、今後の土砂災害警戒区域における警戒避難体制の整備に資するものである。