

松山市城山斜面崩壊地の 地形分析と周辺斜面調査について

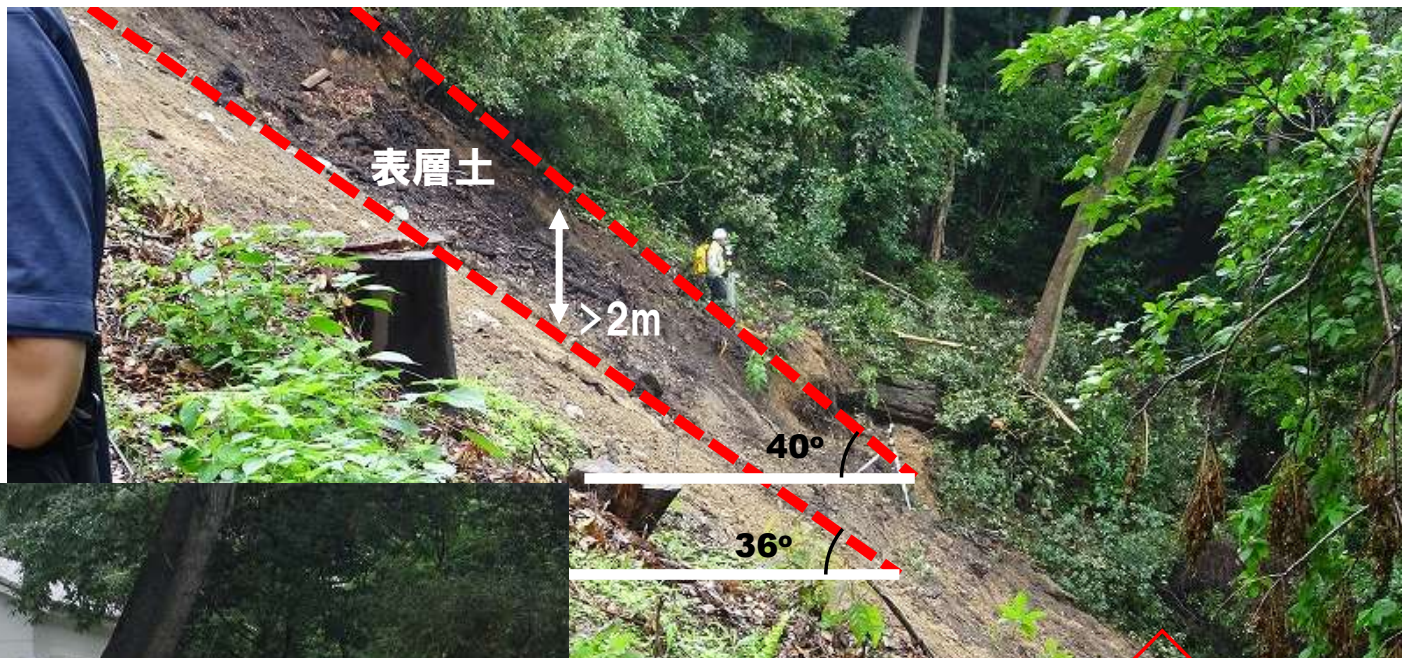
防災情報研究センター・センター長（社会共創学部・教授）

バンドリ ネットラ プラカシュ

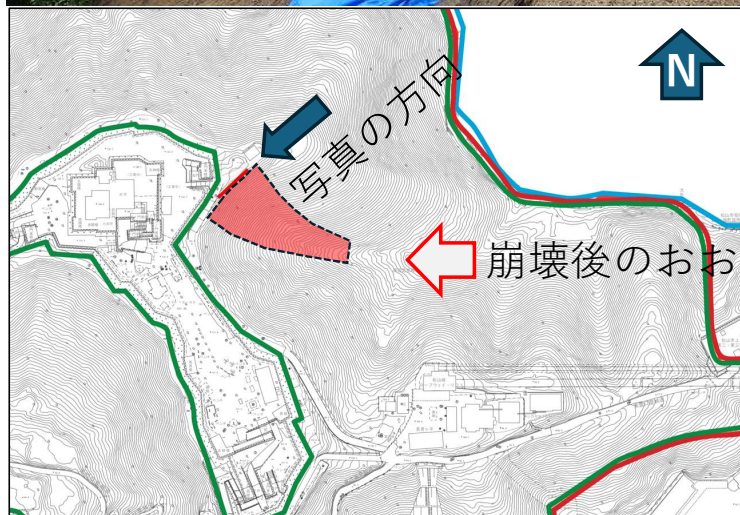
2024.8.10 第3回松山市城山斜面崩壊・緑町土砂災害調査速報会

斜面崩壊源頭部①

- 源頭部付近未崩壊部分の傾斜は、約40°と推定できる
- 崩壊後の傾斜は、約36°と推定できる
- 滑落崖の傾斜は、約53°と推定できる



斜面崩壊源頭部②

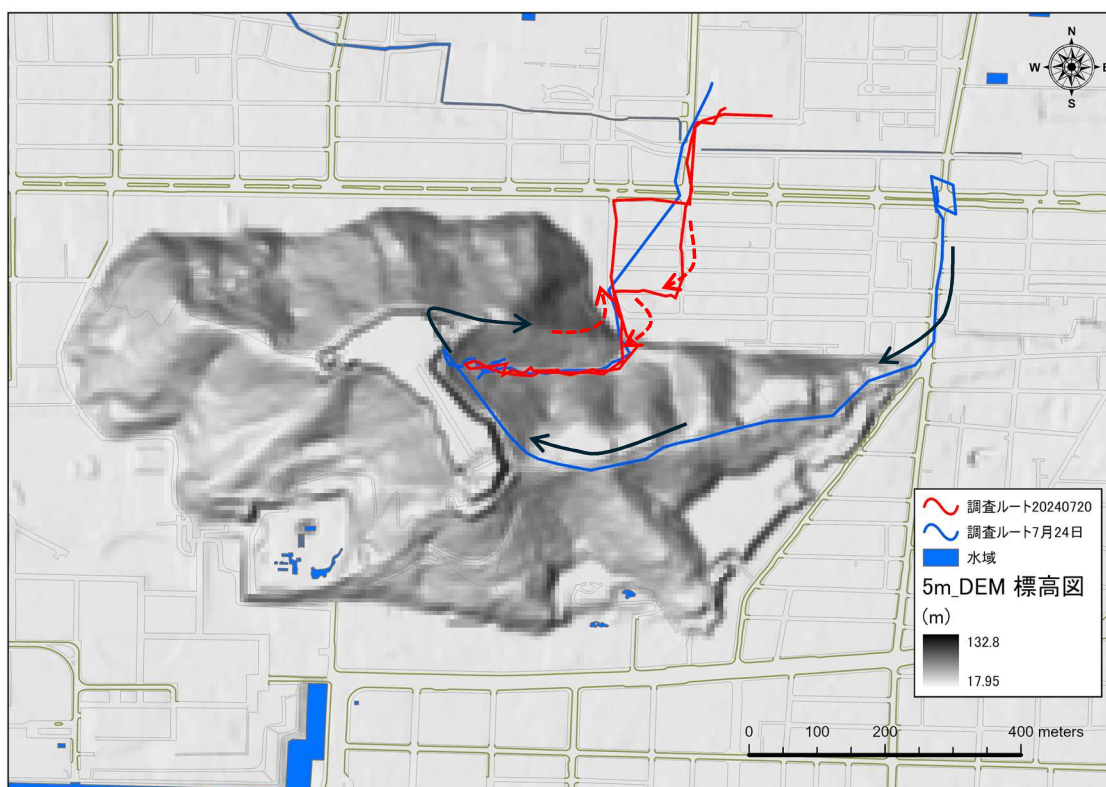


- 反対側からも崩壊土層厚は1~2mと推察できる
- 黄色・茶色く見えるものは砂岩の風化土層と推察
- 崩壊斜面末端の土層厚は1~2mと推察するが、崩壊斜面中央部は3m以上と推察

引用：松山市（2019）「史跡松山城跡保存活用計画」令和元年（2019）9月

崩壊斜面における現地調査

- 1回目 2024年7月20日 (踏査、簡易写真測量、土試料採集等)
- 2回目 2024年7月24日 (踏査、簡易写真測量、土試料採集等)
- 3回目 2024年8月 7日 (簡易動的コーン貫入試験)
- 4回目 2024年8月 9日 (簡易動的コーン貫入試験)



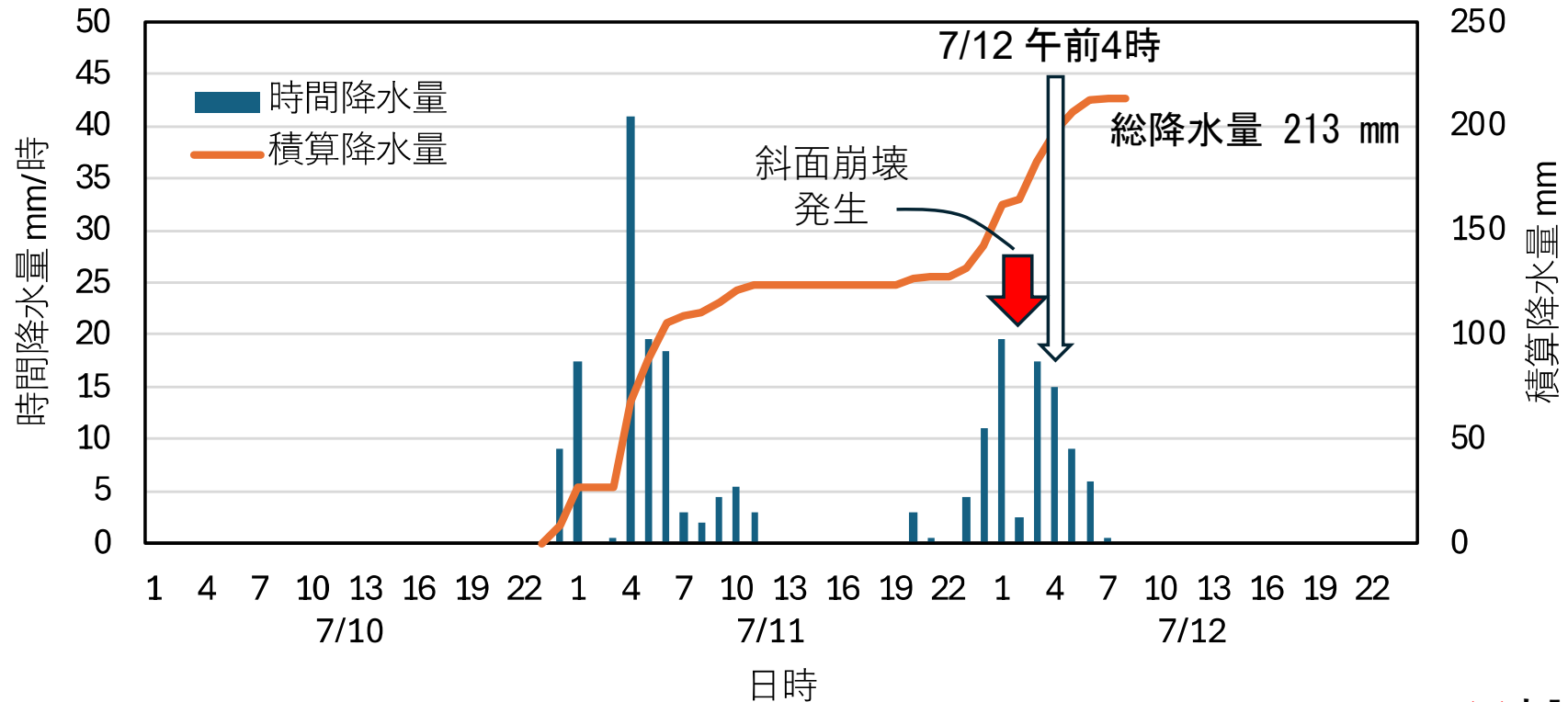
(国土地理院数値標高)



(2016年松山市LP測量による赤色図)

降水量（7月11日～12日、松山地方気象台）

- 7/12 午前4時まで 1時間 15 mm、3時間 35 mm、6時間 70 mm
 - 12時間 73.5 mm、24時間 129.5 mm、48時間 197.5 mm
- mm



※森脇先生ご提供

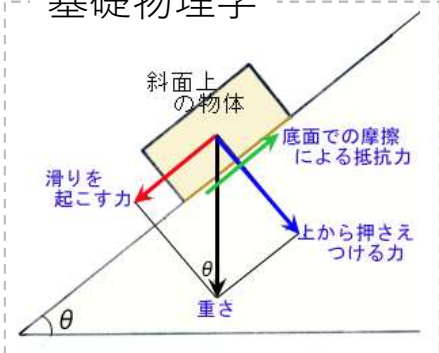
不明なところ（課題）

- 土砂災害の種類 → 土石流？ 泥流？ 土砂流動？
- 災害の原因？ → 土砂流動 ← 斜面崩壊（降雨量、樹木の影響？、その他）
- 初動斜面崩壊点？ 緊急車両道路部分、斜面中腹、崩壊斜面左岸部分
- 歴史的石垣の影響
- パイピング現象による影響
- など

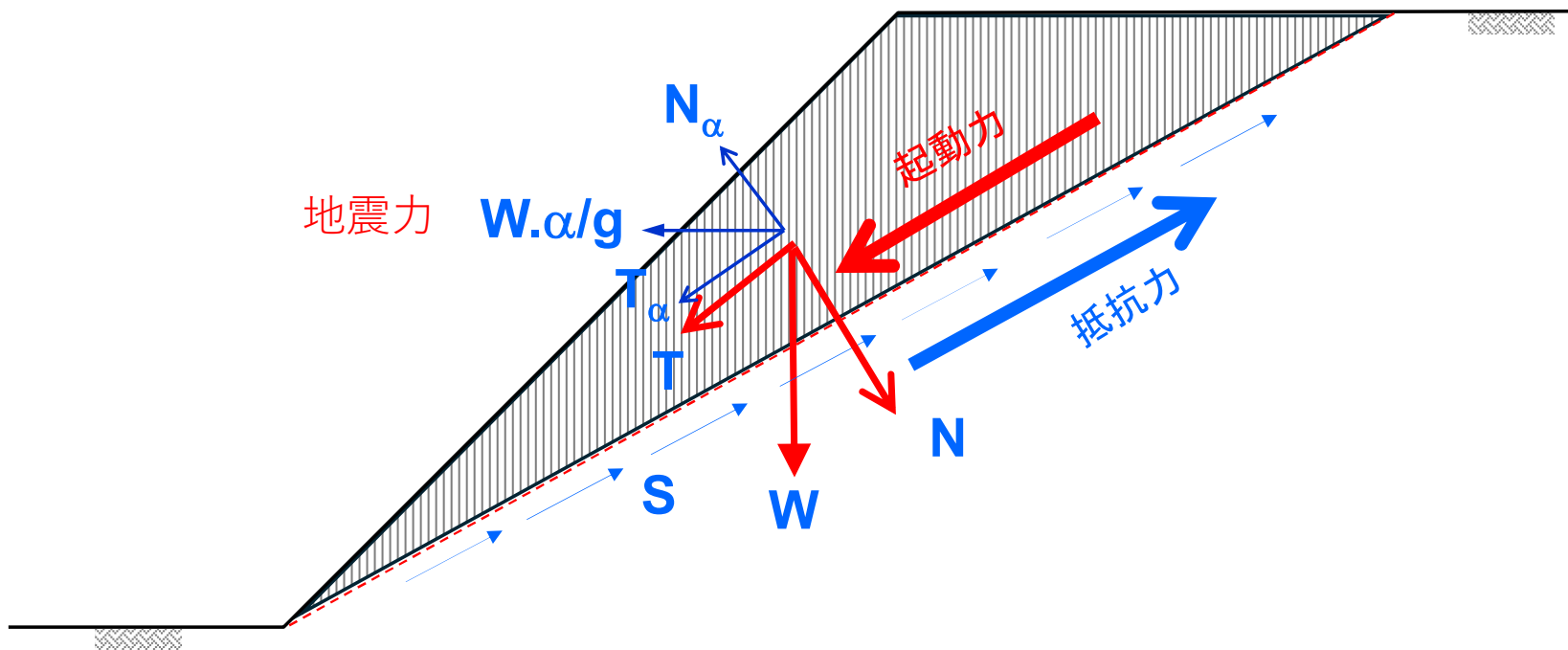
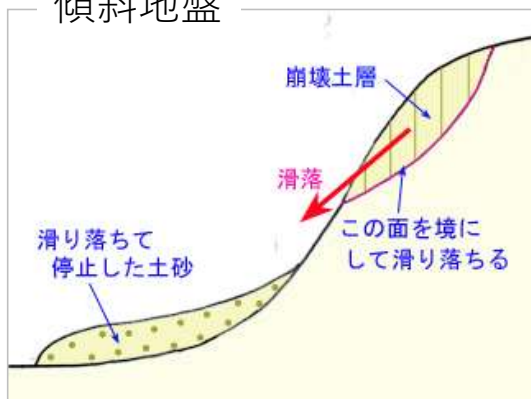
補足説明資料

斜面安定・不安定化の基本

基礎物理学



傾斜地盤



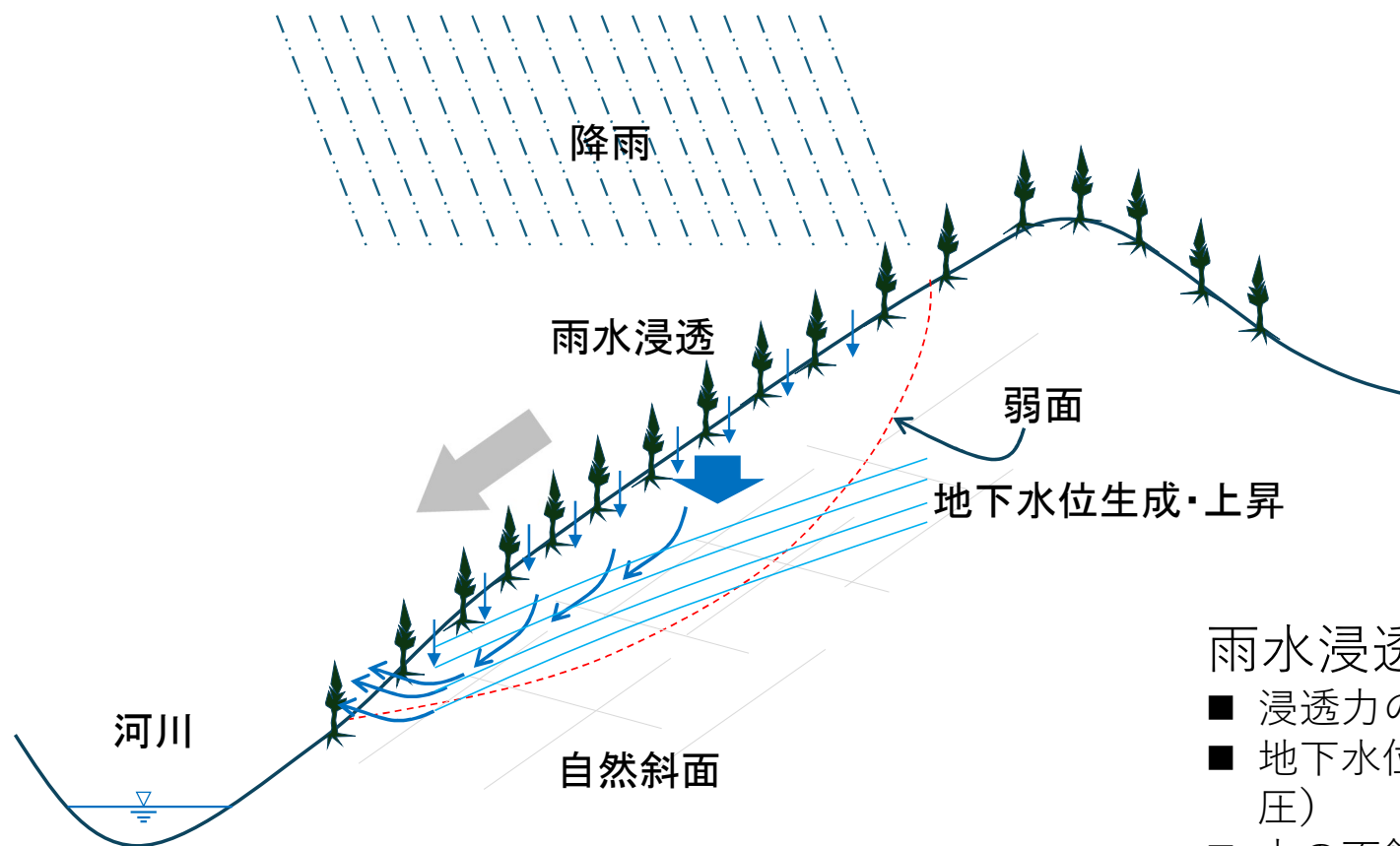
抵抗力 : S
起動力 : T

不安定・崩壊条件:

起動力 \geq 抵抗力

- W : 崩壊しようとする土塊の重量(荷重)
- N : 土塊重量の垂直成分
- T : 土塊重量のすべり方向への成分
- S : すべり面での土の摩擦抵抗
- α : 地震による最大加速度
- g : 重力加速度

斜面崩壊メカニズム一例 (地下水による影響)

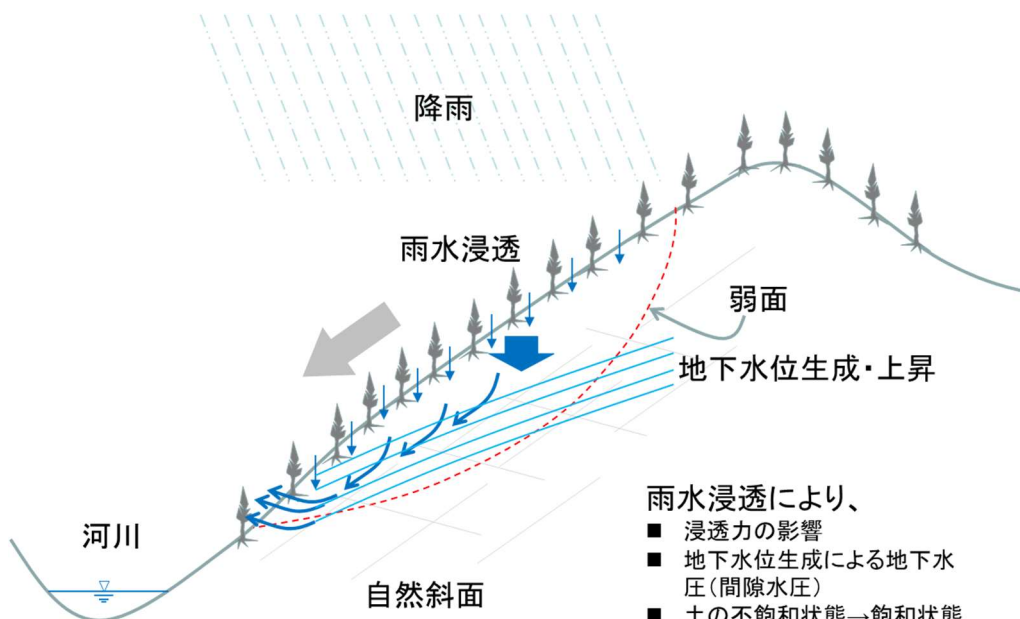


雨水浸透により、

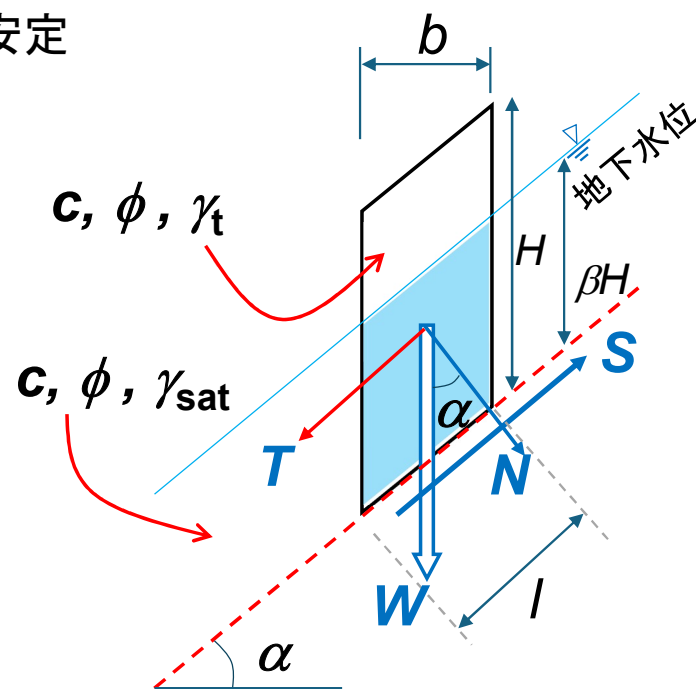
- 浸透力の影響
- 地下水位生成による地下水圧（間隙水圧）
- 土の不飽和状態→飽和状態への変化による粘着力低下
- など

降雨による斜面崩壊メカニズム (地下水による影響)

ここに、
無限斜面を考慮し、安定
計算を行う。

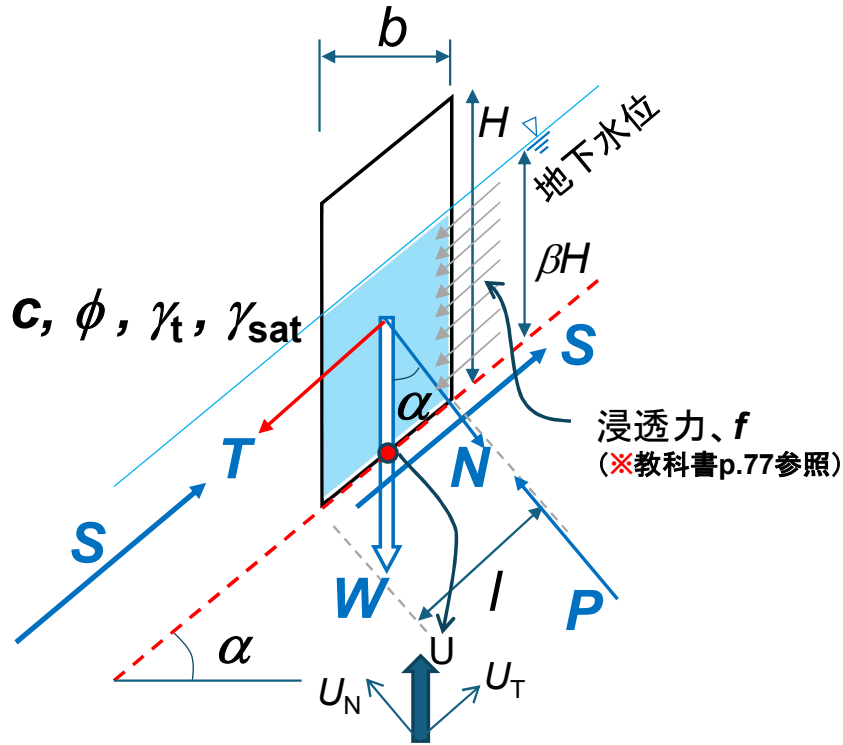


- 雨水浸透により、
- 浸透力の影響
 - 地下水位生成による地下水位(間隙水圧)
 - 土の不飽和状態→飽和状態への変化による粘着力低下
 - など



- W:** 崩壊しようとする土塊の重量(荷重)
- N:** 土塊重量の垂直成分
- T:** 土塊重量のすべり方向への成分
- S:** すべり面での土の摩擦抵抗

無限斜面の安定計算（直線すべり）



- W:** 崩壊しようとする土塊の重量(荷重)
- N:** 土塊重量の垂直成分
- T:** 土塊重量のすべり方向への成分
- S:** すべり面での土の摩擦抵抗
- U:** 地下水位による間隙水圧

■ 地下水位のある場合、

$$N = P = W \cdot \cos\alpha \quad | \quad T = S = W \cdot \sin\alpha$$

$$W = b \cdot H(1 - \beta) \cdot \gamma_t + b \cdot \beta H \cdot \gamma_{sat}$$

摩擦抵抗力、 $S_{max} = \tau \cdot l = (c' + \sigma' \cdot \tan\phi') \cdot l$

$$\therefore S_{max} = c' \cdot l + (P - U \cos\alpha) \cdot \tan\phi'$$

$$S_{max} = c' \cdot l + P' \cdot \tan\phi'$$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma' \cdot l = \sigma \cdot l - U_N \\ \sigma \cdot l = N \\ U_N = U \cdot \cos\alpha \end{array} \right\}$$

起動力: $T + f - U_T$

$$= W \cdot \sin\alpha + b \cdot \beta H \cdot \gamma_w \sin\alpha - U \cdot \sin\alpha$$

$$= W \cdot \sin\alpha$$

$$\left\{ U = b \cdot \beta H \cdot \gamma_w \right\}$$

無限斜面の安定計算（直線すべり）

安全率

$$F_s = \frac{c'.l + P'.\tan\varphi'}{W.\sin\alpha}$$



整理する。

$$= \frac{c'.l + (b.H(1-\beta).\gamma_t + b.\beta H.\gamma_{sat} - b.\beta H.\gamma_w).\cos\alpha.\tan\varphi'}{(b.H(1-\beta).\gamma_t + b.\beta H.\gamma_{sat}).\sin\alpha}$$

$$= \frac{c'.l + bH((1-\beta).\gamma_t + \beta(\gamma_{sat} - \gamma_w)).\cos\alpha.\tan\varphi'}{b.H((1-\beta).\gamma_t + \beta.\gamma_{sat}).\sin\alpha}$$

$$= \frac{c'.b/\cos\alpha + bH((1-\beta).\gamma_t + \beta(\gamma_{sat} - \gamma_w)).\cos\alpha.\tan\varphi'}{b.H((1-\beta).\gamma_t + \beta.\gamma_{sat}).\sin\alpha}$$

■ 地下水位のある場合、

$$W = b.H(1-\beta).\gamma_t + b.\beta H.\gamma_{sat}$$

$$P' = P - U\cos\alpha$$

$$P = W.\cos\alpha$$

$$U = b.\beta H.\gamma_w$$

$$l = b/\cos\alpha$$

$$\gamma_{sat} - \gamma_w = \gamma' \leftarrow \text{水中単位堆積重量}$$

安全率

$$F_s = \frac{c' + H((1-\beta).\gamma_t + \beta\gamma').\cos^2\alpha.\tan\varphi'}{H((1-\beta).\gamma_t + \beta.\gamma_{sat}).\cos\alpha.\sin\alpha}$$

無限斜面の安定計算（直線すべり）

部分浸水の場合

① 砂斜面の場合

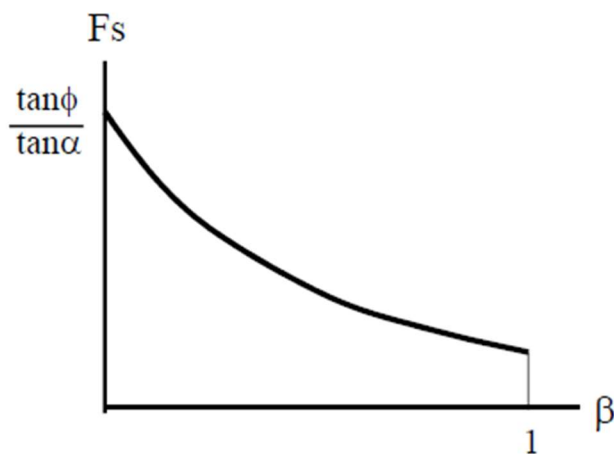
砂質土で $c=0$ とすると、安全率は次式になる

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \frac{(1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma'}{(1-\beta)\gamma_t + \beta\gamma_{sat}}$$

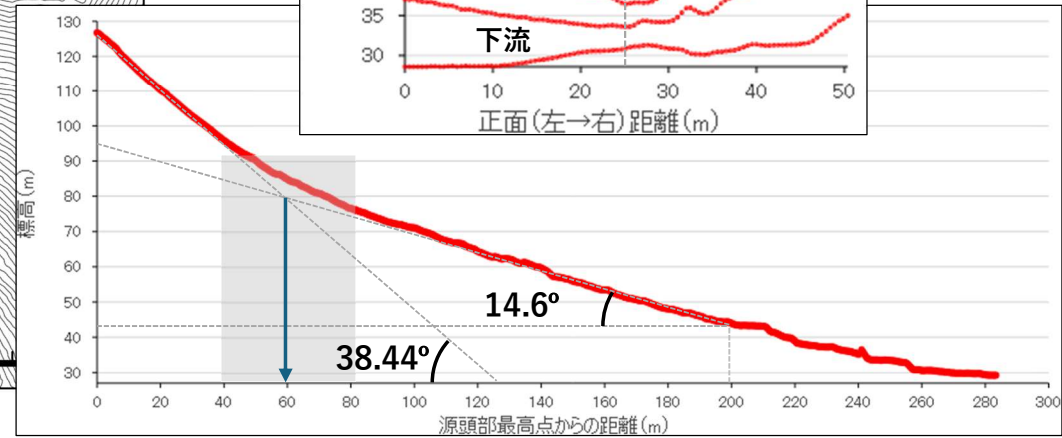
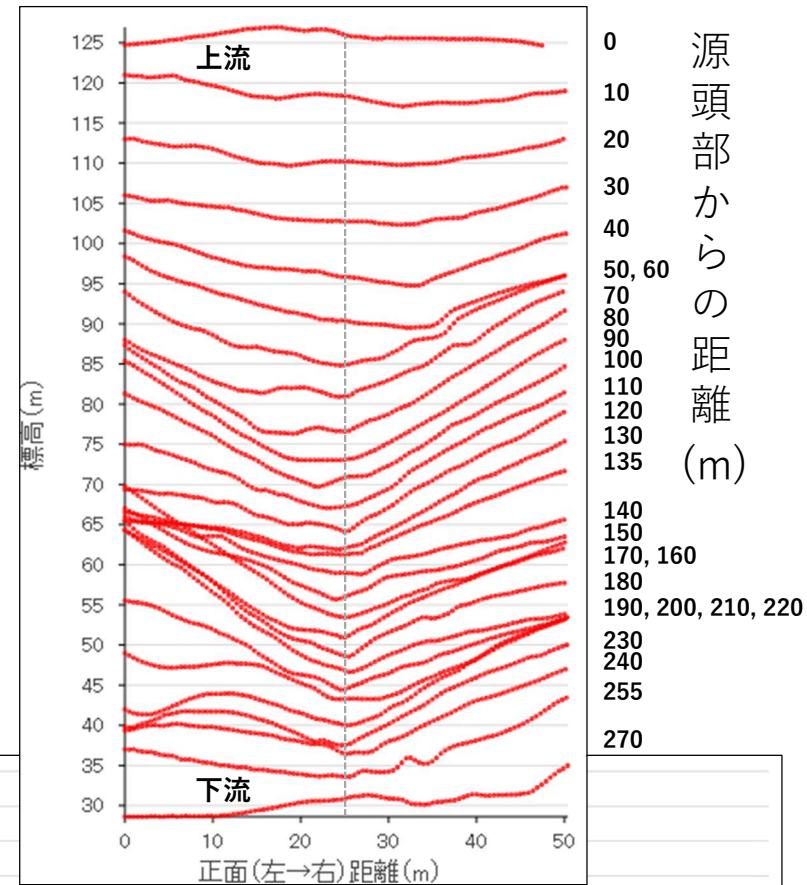
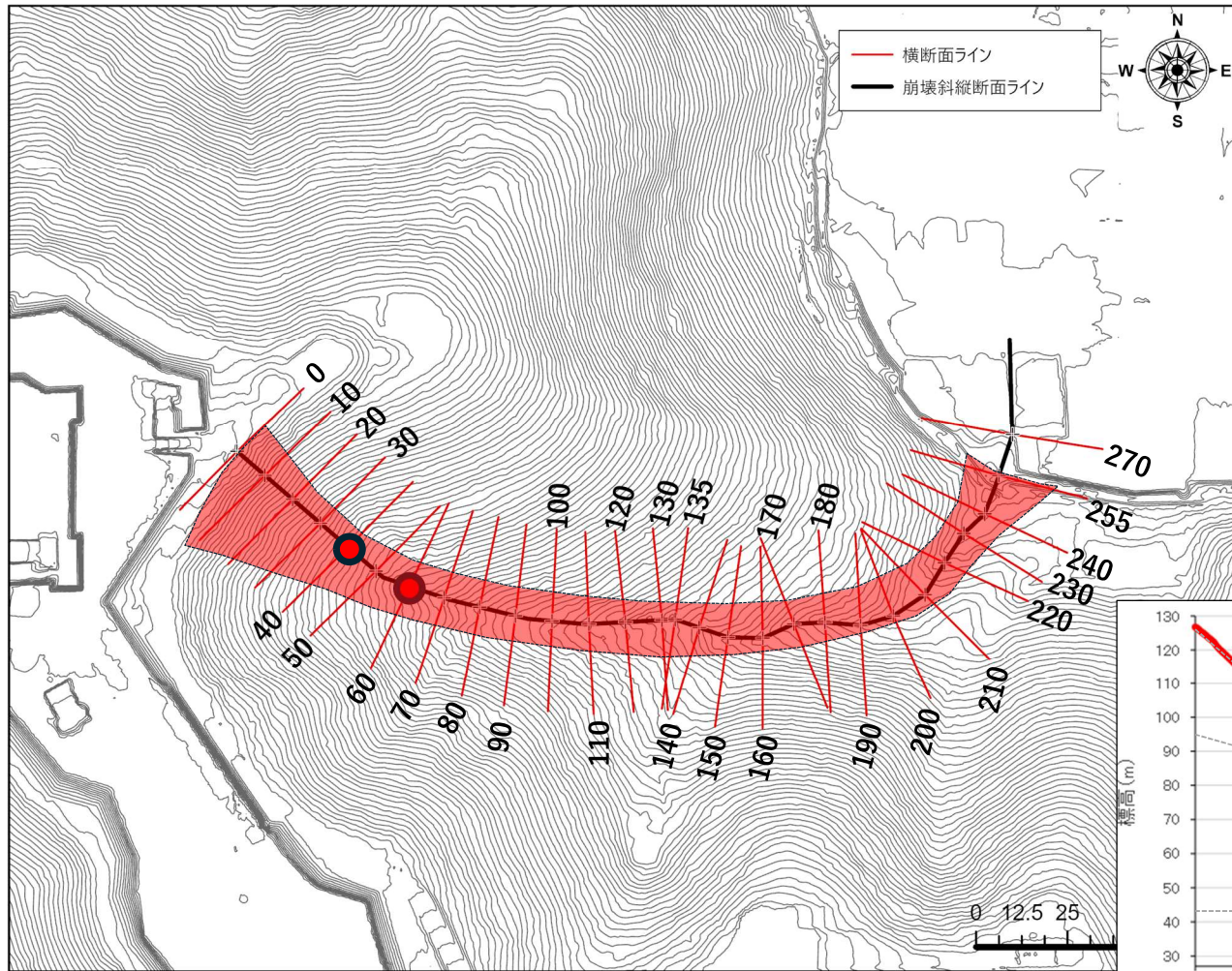
ここで、簡単のために $\gamma_t = \gamma_{sat}$ とおくと、

$$F_s = \frac{\tan\phi}{\tan\alpha} \frac{\gamma_{sat} - \beta\gamma_w}{\gamma_{sat}}$$

水位上昇（ β 増加）により安全率が低下することがわかる。



崩壊斜面・谷地形の縦・横断面



ドローン撮影による3Dオルソ画像

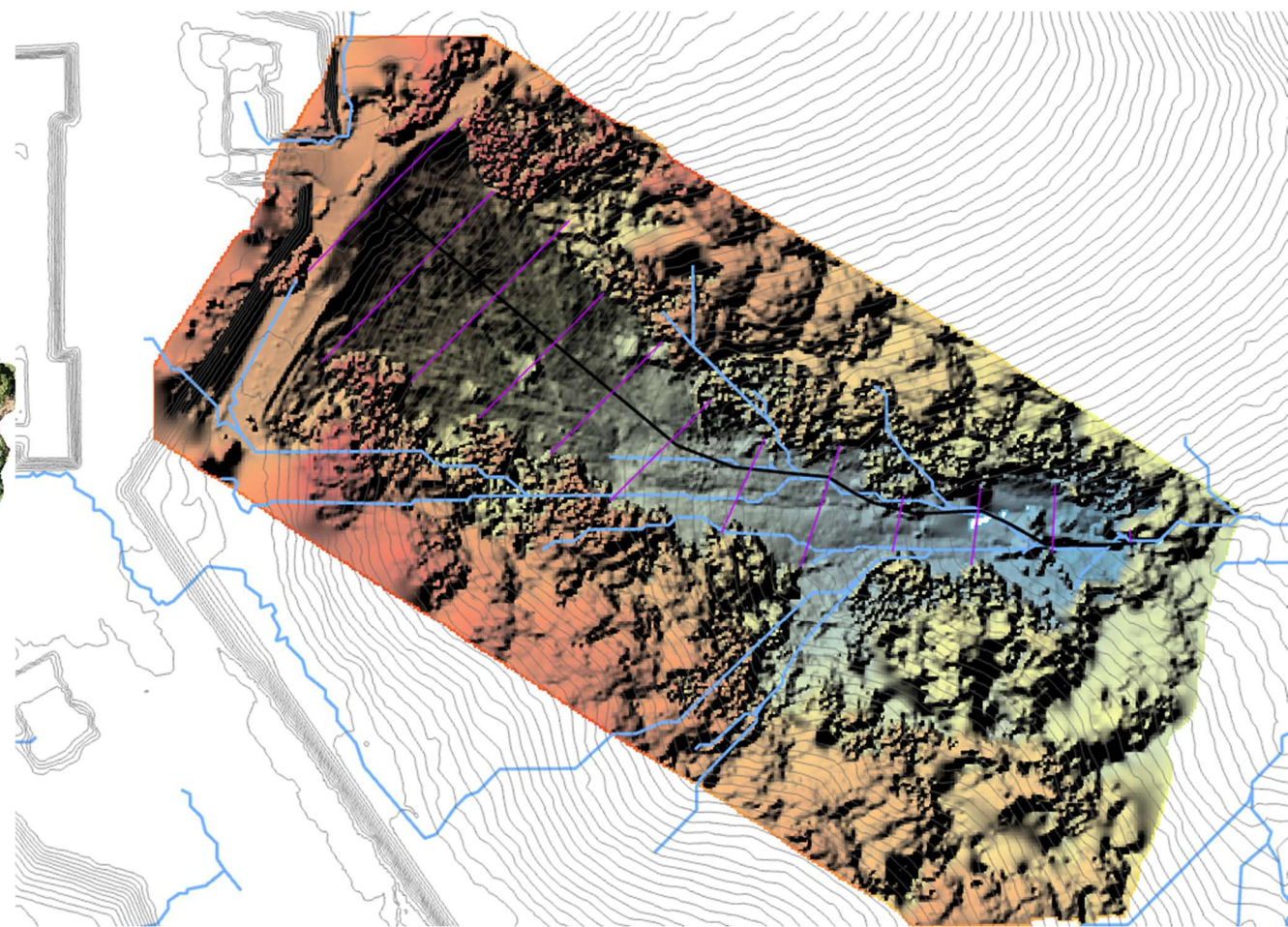
崩壊斜面の25cm-DEM (標高図)

※岡村教授ご提供

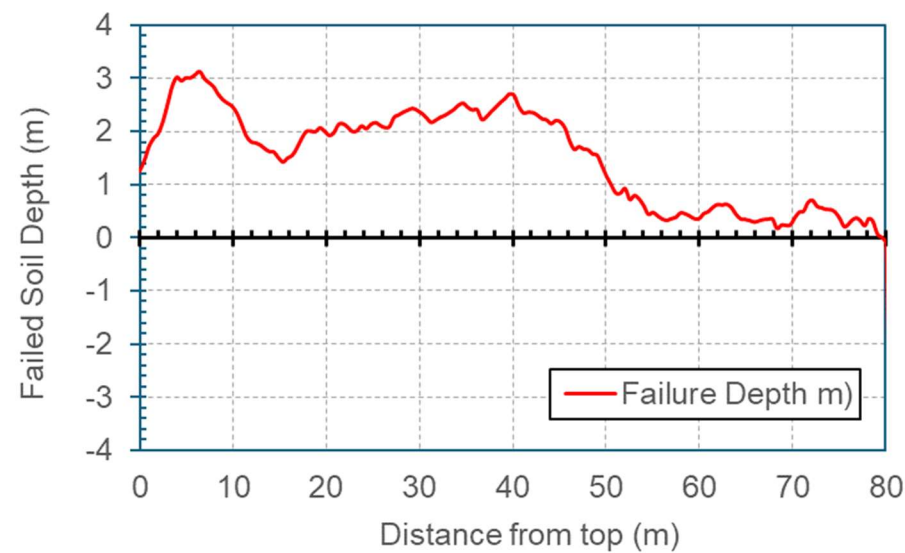
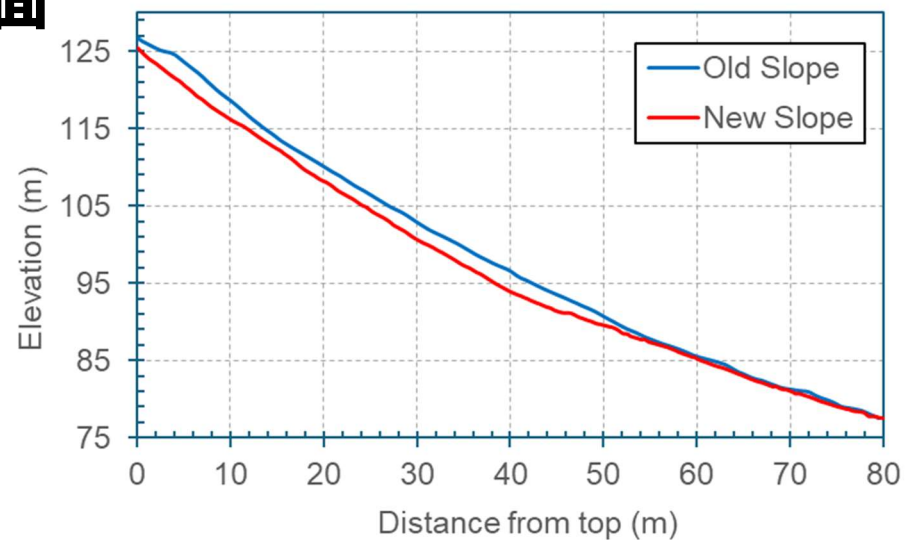
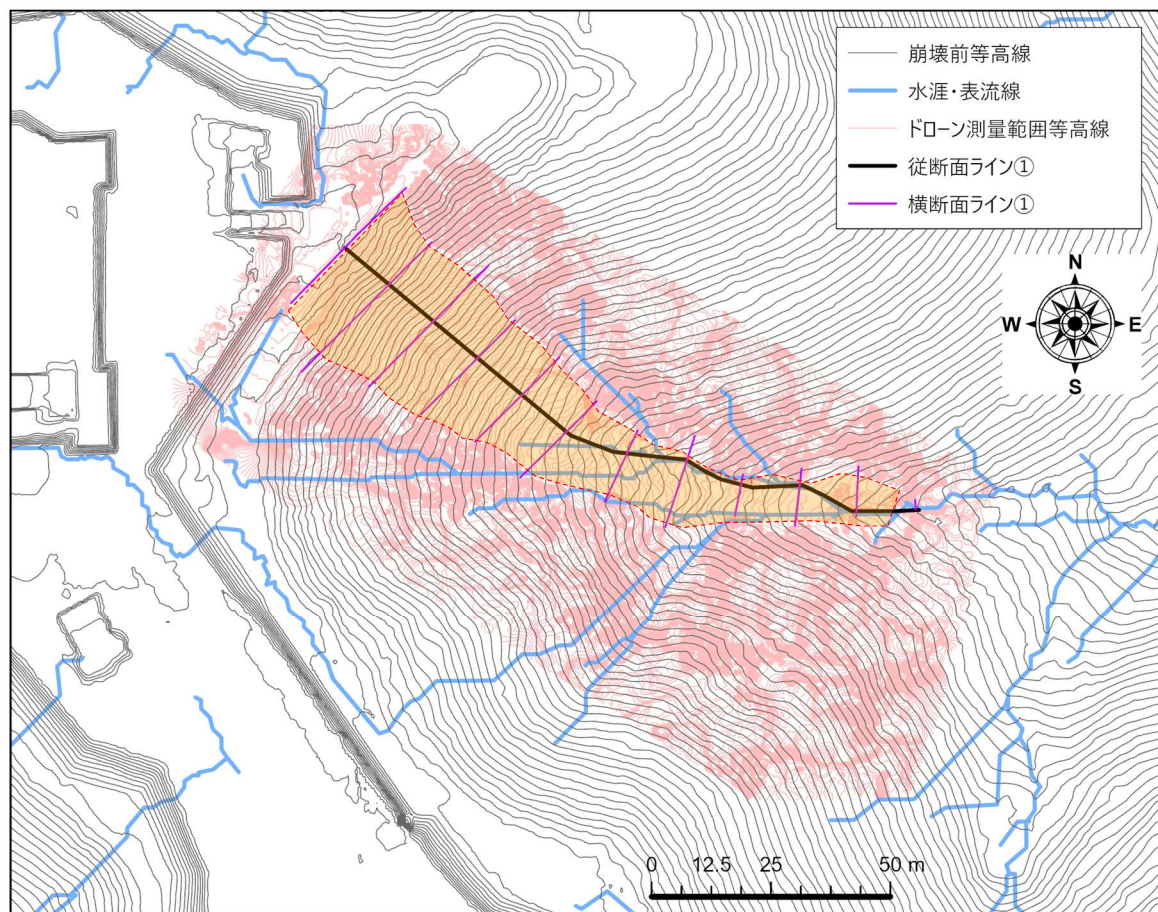


崩壊斜面のドローンオルソ画像

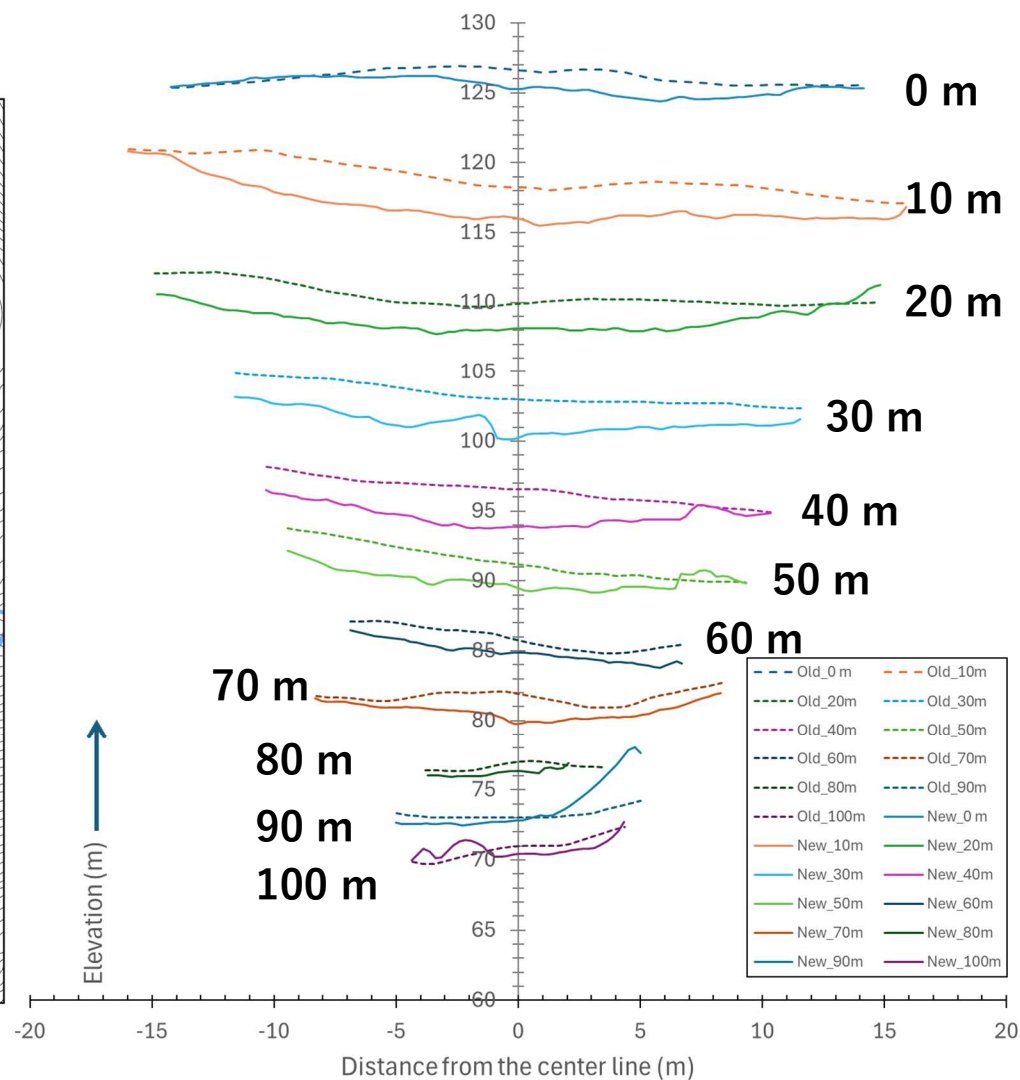
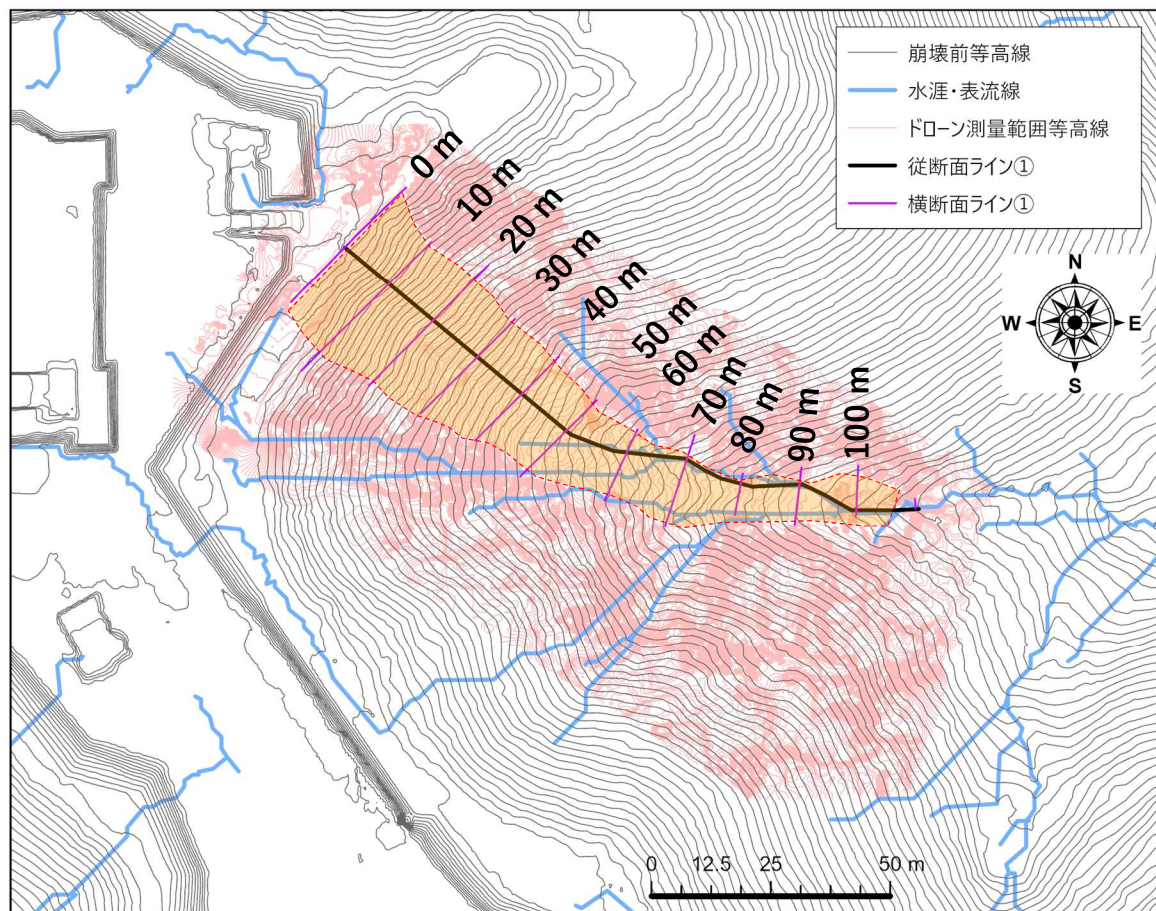
※岡村教授ご提供



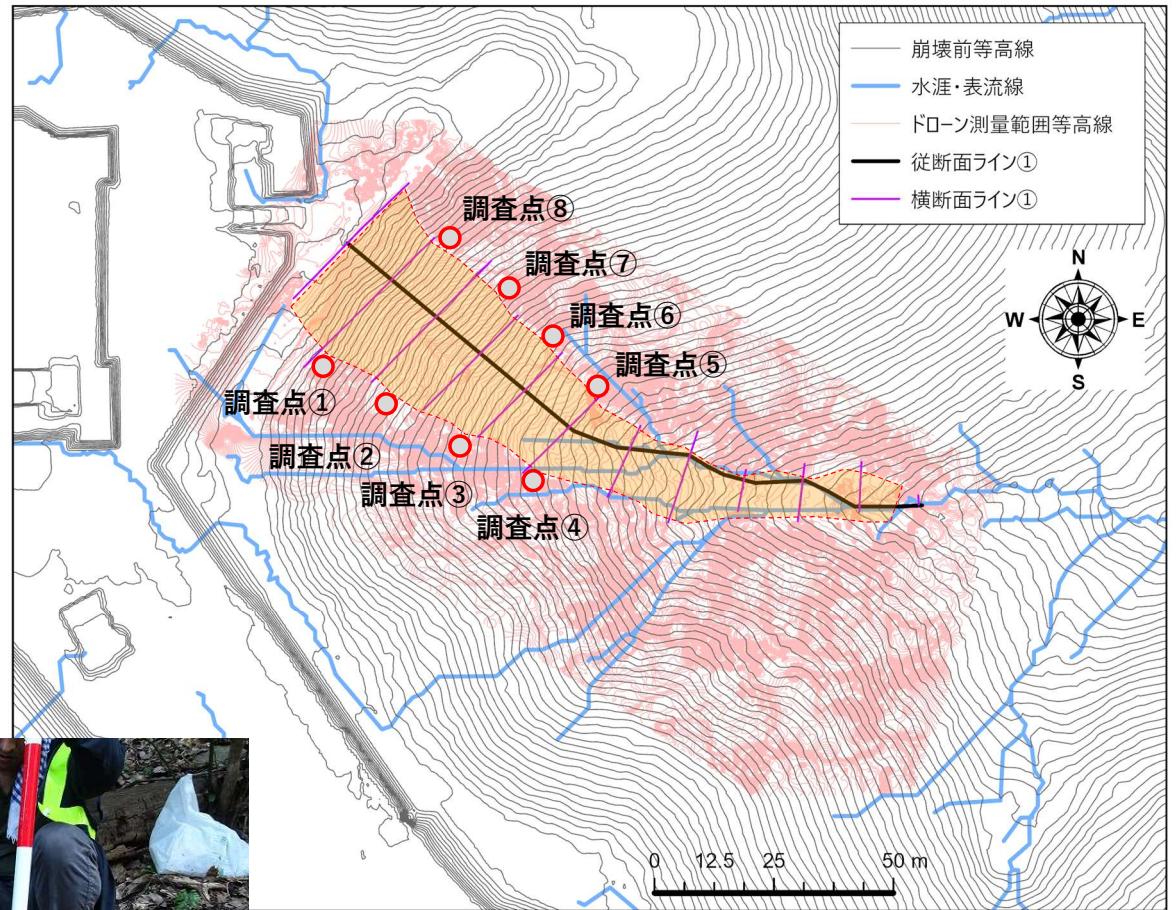
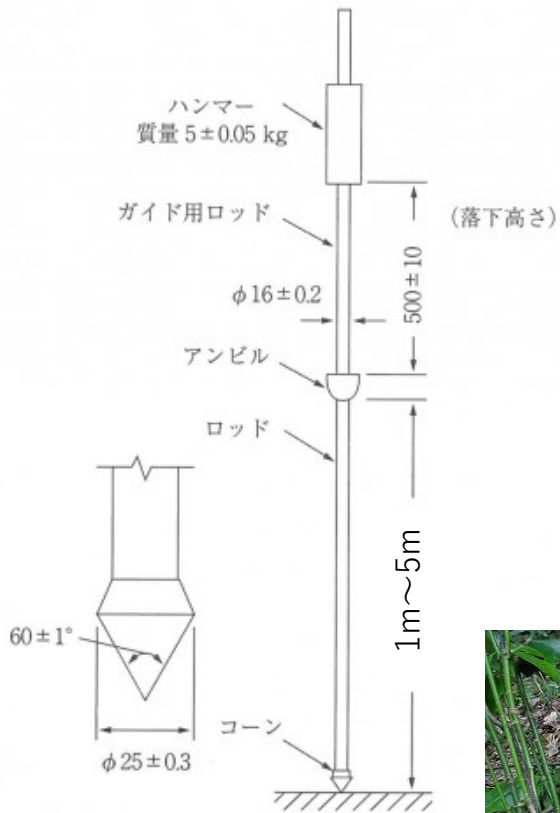
崩壊斜面 崩壊前後の縦断面・崩壊土層厚断面



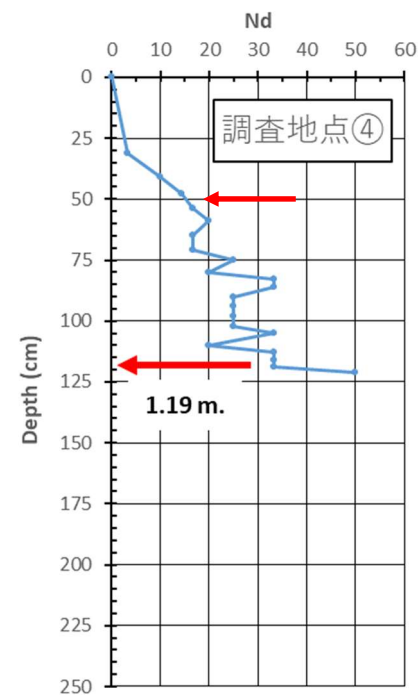
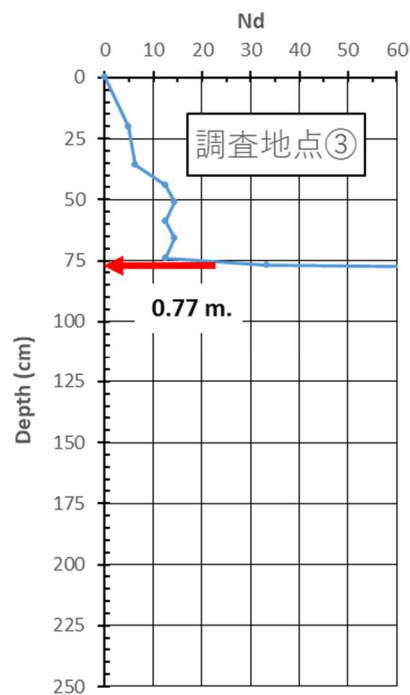
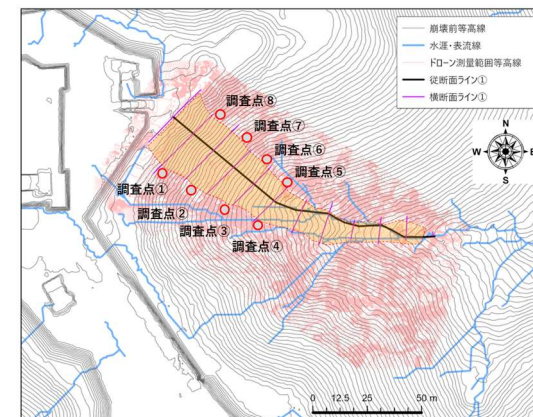
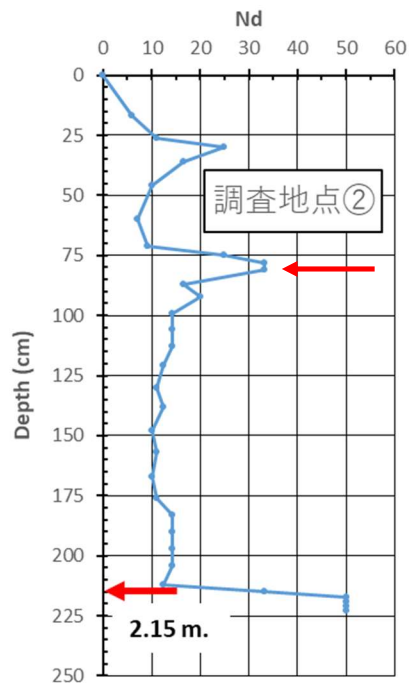
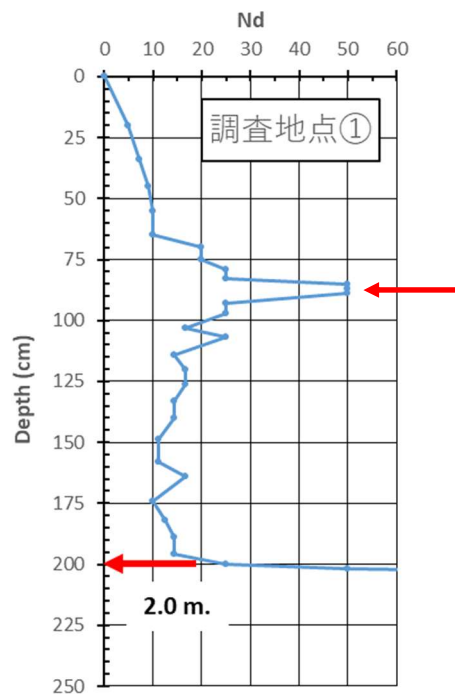
崩壊斜面 崩壊前後の横断面 (10m間隔)



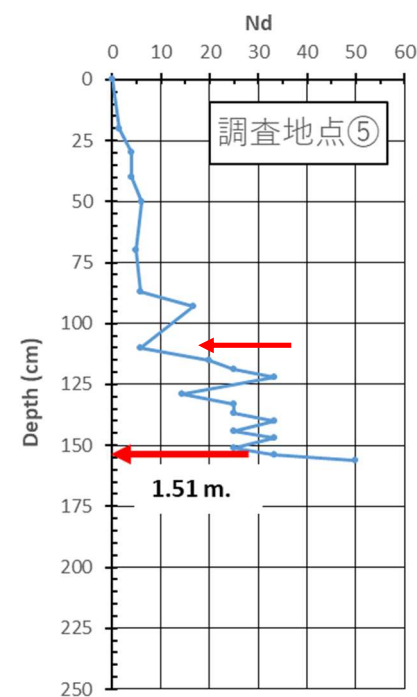
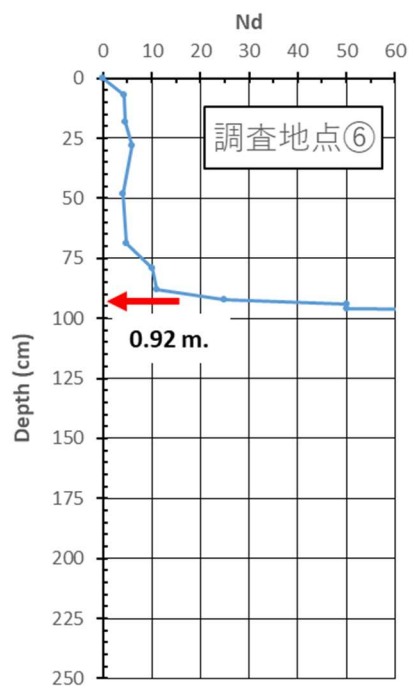
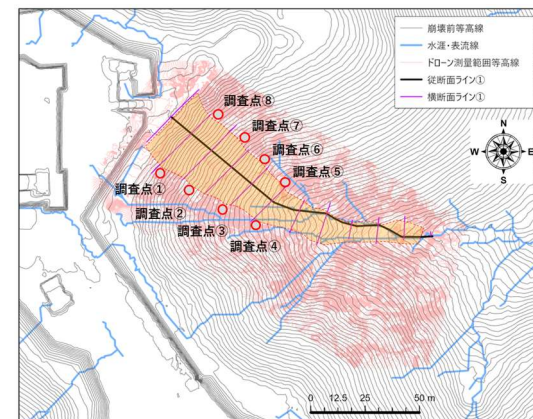
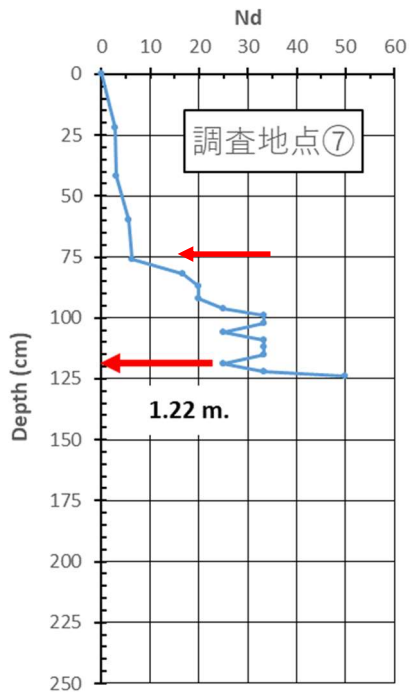
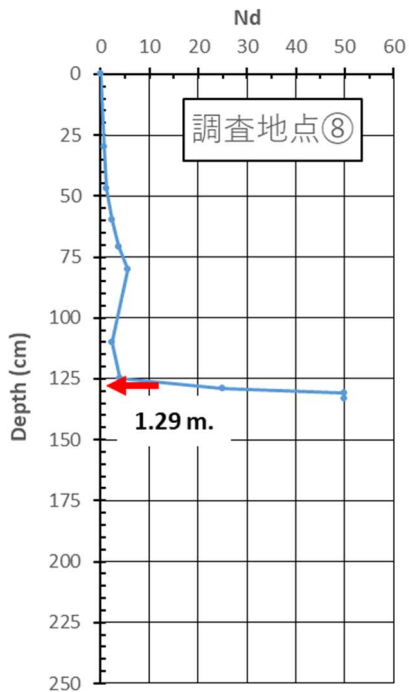
簡易動的コーン貫入試験



簡易動的コーン貫入試験 (調査地点①～④)



簡易動的コーン貫入試験 (調査地点⑤～⑧)



まとめ

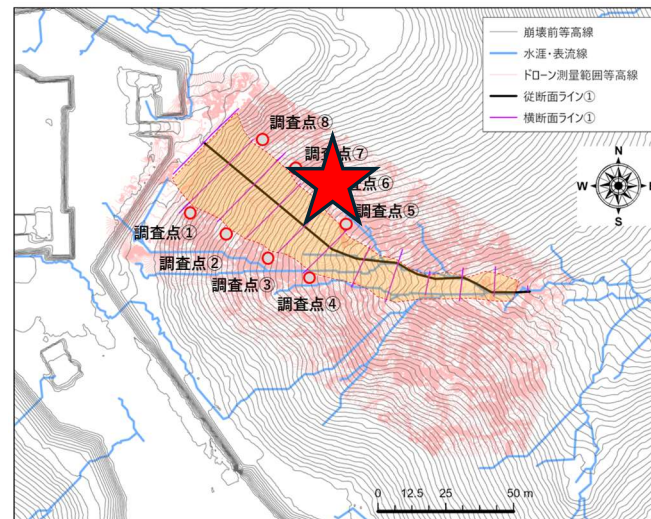
- 累積雨量約160mm（7月12日、午前2時時点）で植物・樹木の根っこ沢山含まれる風化砂岩の斜面が崩壊するとは考えにくい。
- 第1回観察調査時に、激しい降雨による雨水は、工事中の道路から斜面に直接入っていないことを確認していることから、源頭部への流入はなかったと考えられる。
- 単なる雨水の浸透だけではなく、他所から流れて斜面部に流入する水が引き金的原因と考えられる。
- 工事中の道路の盛土部分の斜面が先に崩壊し、その崩壊土が中腹部斜面を押し込んだとは考えにくいですが、これは今後浸透流解析と斜面安定解析を行い検証する必要がある。

今後の課題

- 土質試験結果や現地調査（例：動的コーン貫入試験やドローン撮影による詳細なDEM作成）を基に、浸透流解析や斜面安定解析の実施
- 2次元・3次元斜面安定解析 → 各種パラメータの必要
- 室内実験・現地観測等による土質パラメータの設定
- 初動崩壊斜面部の把握、そのメカニズム解明

最後に、

石垣らしきもの



巣穴のようなパイピングホール