

# 液状化に起因する長距離地盤流動により被災したインフラ施設の復旧と対策



東京大学生産技術研究所 清田 隆

愛媛大学： 岡村未対・小野耕平

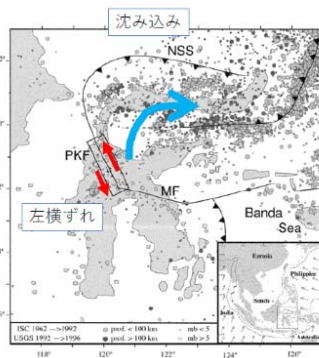
九州大学： ハザリカ ヘマンタ

八千代エンジニアリング： 古市久士

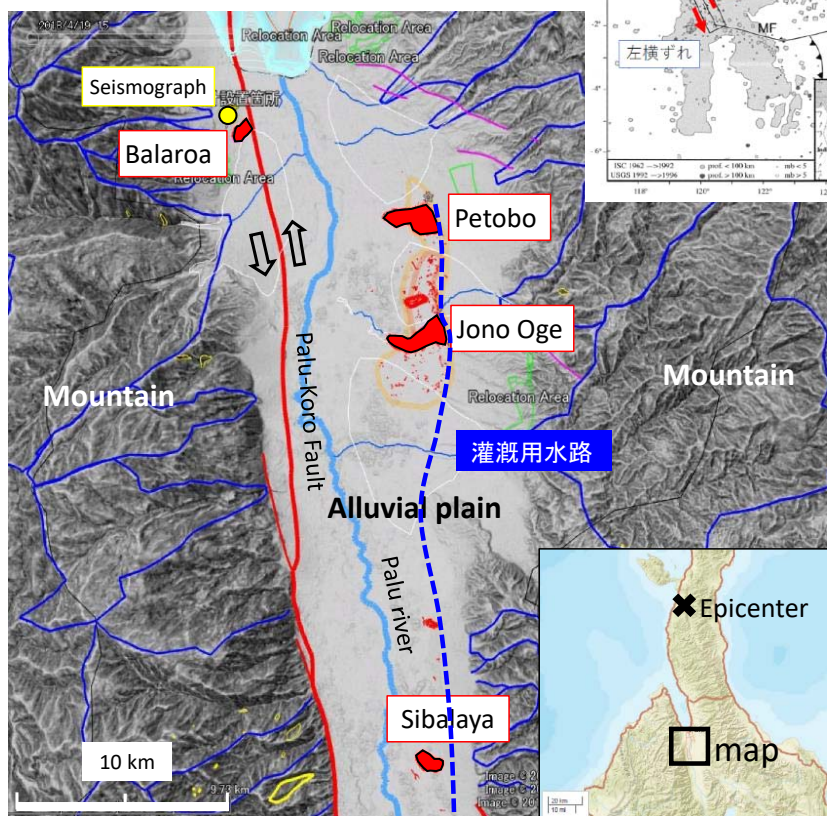


## 2018年スラウェシ島地震 長距離地盤流動の概要

- ◆ Mw 7.5 (Depth 10km)、左横ずれ断層
- ◆ 地すべりは東西の山脈に挟まれた幅約10kmの沖積低地(扇状地)で発生



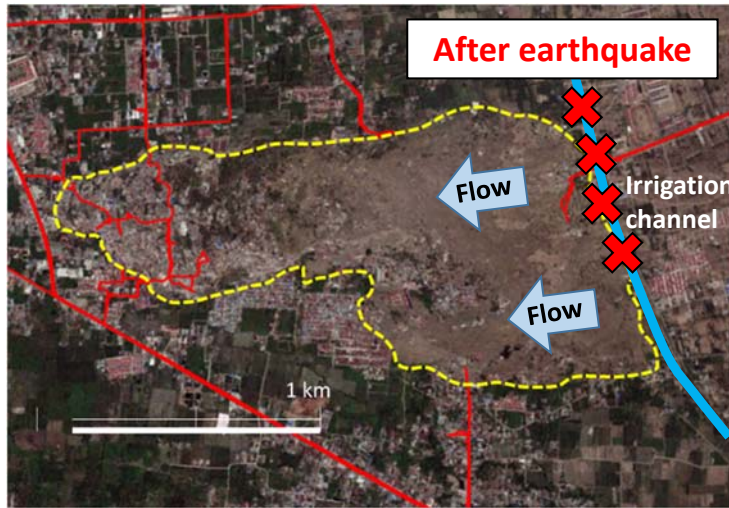
地すべり面積と被害家屋数	
Balaroa	0.39km <sup>2</sup> (930 houses)
Petobo	1.63km <sup>2</sup> (1255 houses)
Jono Oge	1.75km <sup>2</sup> (238 houses)
Sibalaya	0.5km <sup>2</sup> (unknown)



僅か1~4%程度の地表面勾配にも関わらず数百m以上の地盤流動



# 研究の背景・目的



地震前の斜面勾配: 2~3% (1~2 deg), 流動斜面上部に灌漑用水路があり、大きな被害を受けた。



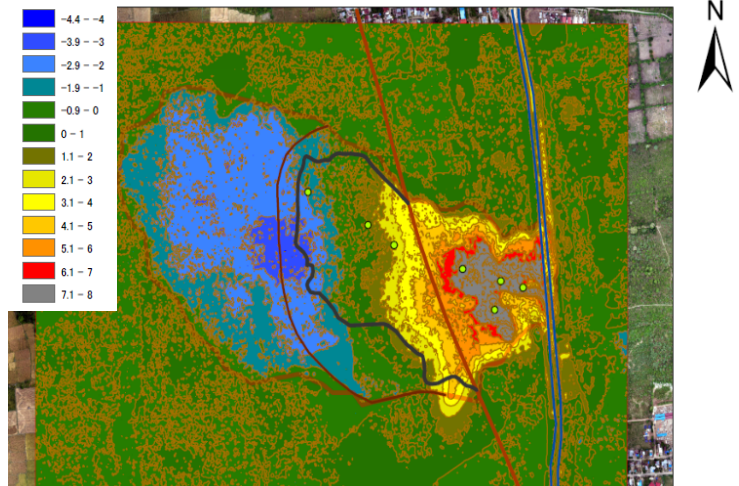
## 研究の目的

長距離地盤流動の要因として、被圧地下水の存在が考えられるが、具体的な発生機構は未解明

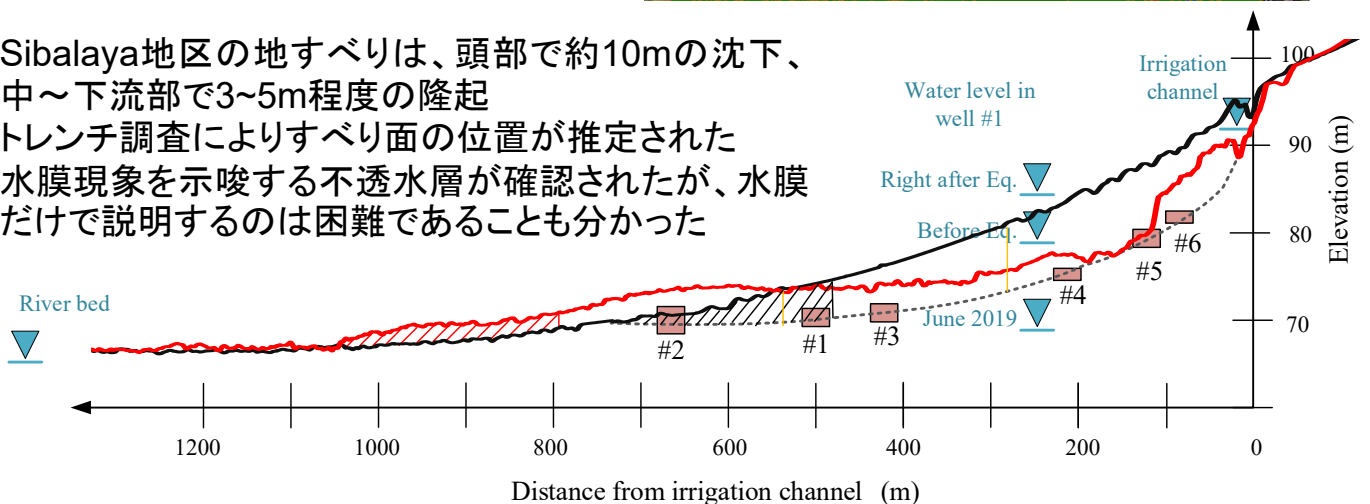
- 発生メカニズムの解明
  - 液状化・被圧の影響?
  - 灌漑用水路の影響?
- 対策の方針



# UAV測量を用いた流動前後の地形変化

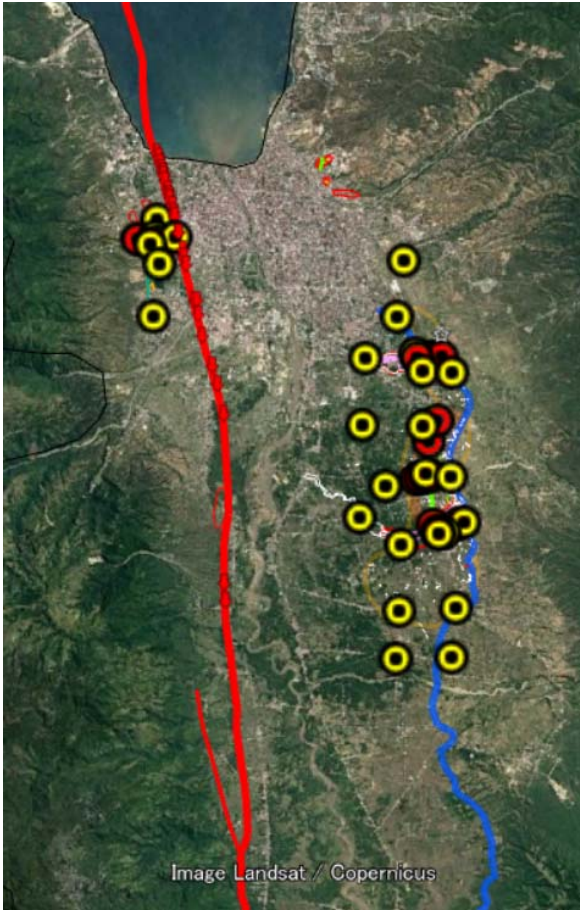


- ◆ 灌漑用水路は流動開始後に決壊⇒ 決壊した水が地すべりを引き起こしたのではない
- ◆ Sibalaya地区の地すべりは、頭部で約10mの沈下、中～下流部で3~5m程度の隆起
- ◆ トレンチ調査によりすべり面の位置が推定された
- ◆ 水膜現象を示唆する不透水層が確認されたが、水膜だけで説明するのは困難であることも分かった



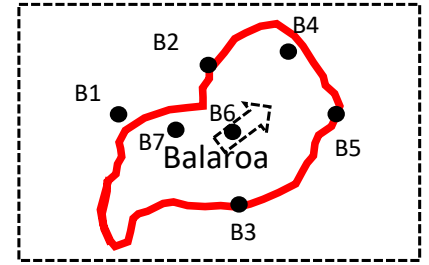
# ボーリング調査・現地ヒアリング

◆ 灌漑水路の建設は1980年代。建設後から下流域では地下水位が上昇した。

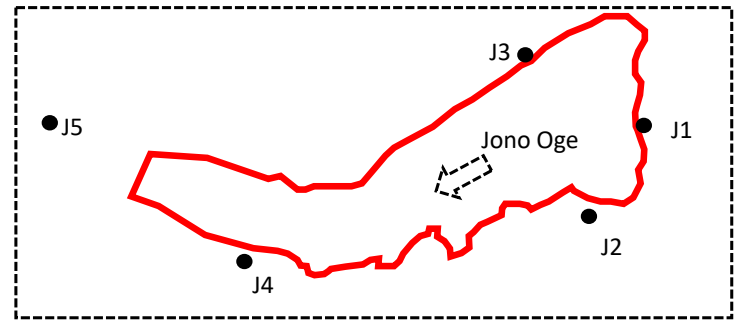
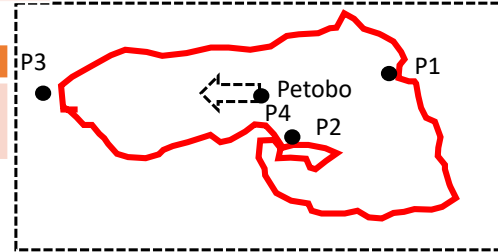


地震後の地盤挙動  
(流動域内にいた人の答え)

Loc.	Outline of interview result
B6	Ground lifted up to 4-5 m before horizontal movement. Ground rotated in counter-clockwise while flown.
B7	House was lifted up to 20m and rotated before collapsed.

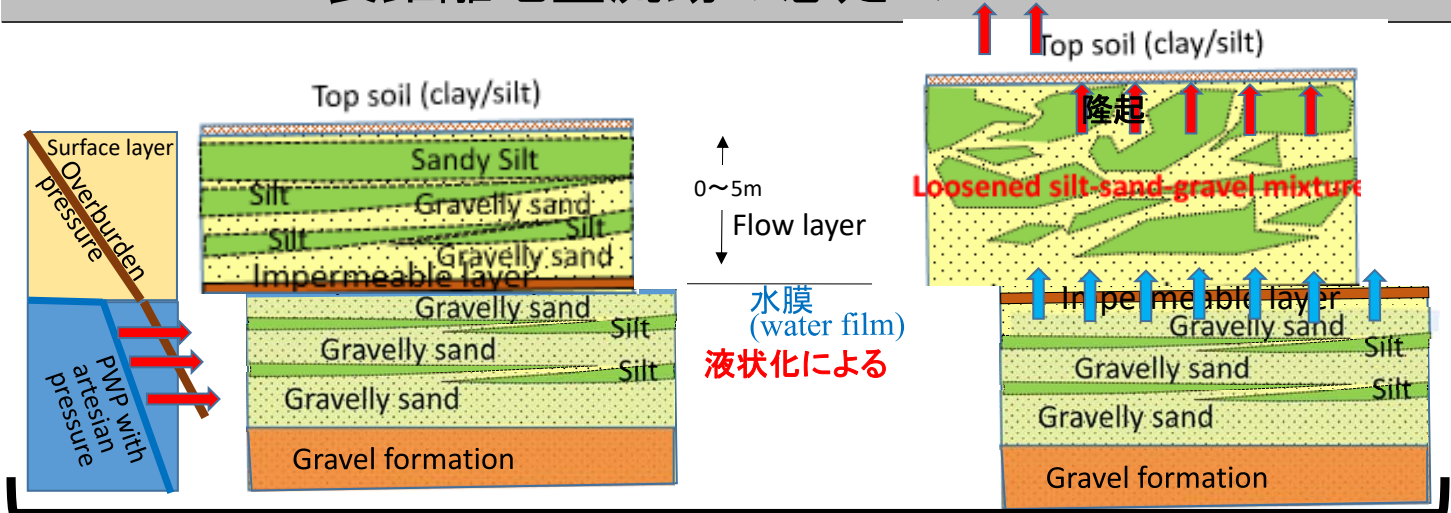


Loc.	Outline of interview result
P4	Ground lifted up 1-2 min after earthquake, and the ground roared.

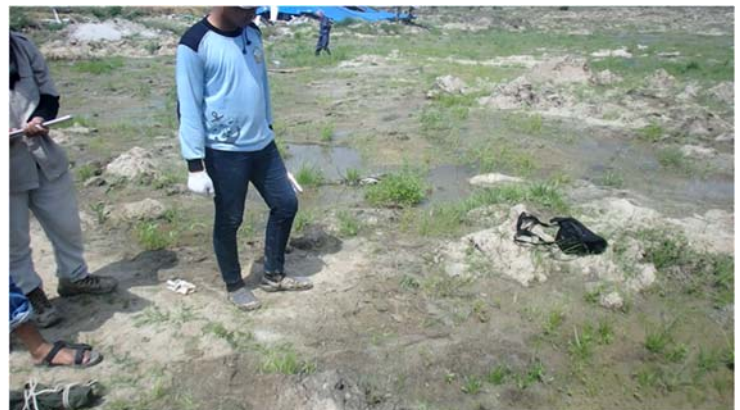
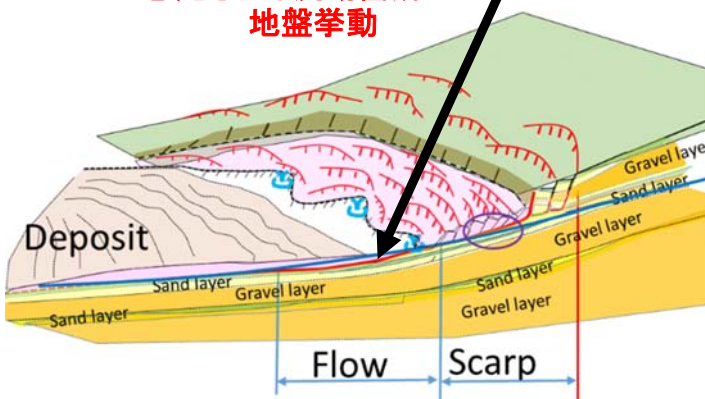


JICA国内支援委員会レポート 2021

## 長距離地盤流動の想定メカニズム



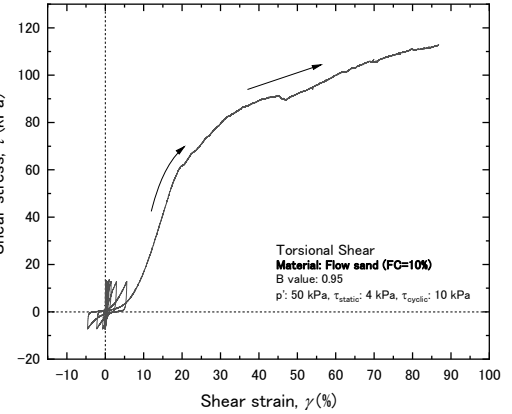
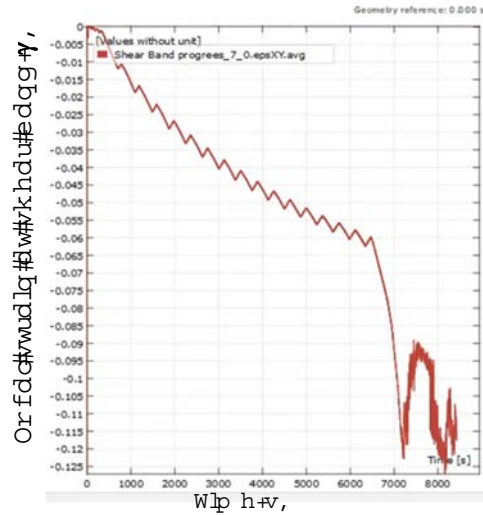
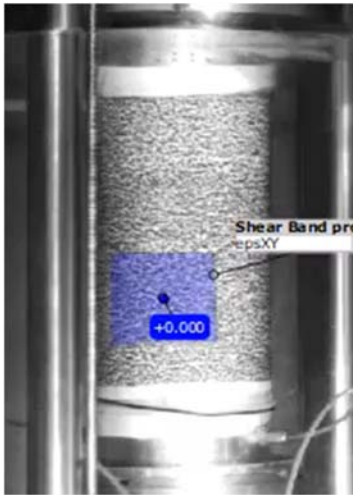
想定される流動箇所での地盤挙動



地震から一か月後の様子  
表層地盤は依然として泥水に近い。

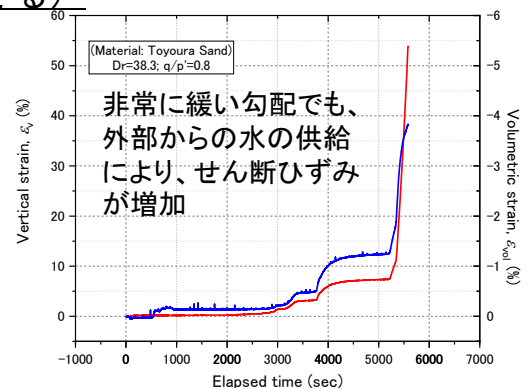
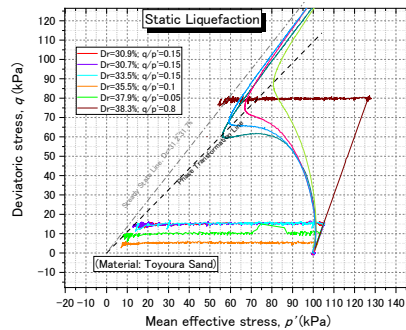
# 室内土質試験

## 液状化した後の非排水強度変形特性（流動を説明できない）



液状化後に顕著なひずみ硬化が発生  
⇒ 地盤流動は発生しない

## 地下水流入を考慮した強度変形特性（流動を説明できる）



非常に緩い勾配でも、  
外部からの水の供給  
により、せん断ひずみ  
が増加

## 流動を引き起こした水の起源諸説

- ① 液状化層からの排水
- ② 被圧地下水
- ③ 断層等からの噴出水

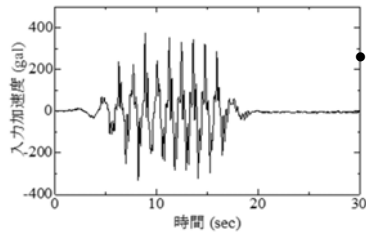
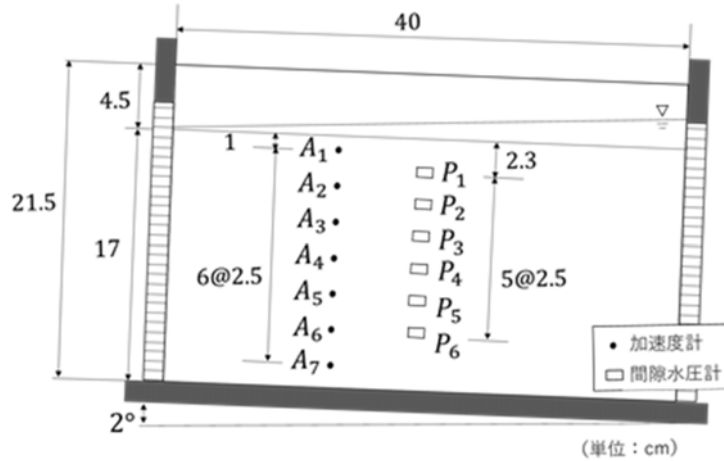
### 事実確認

- ✓ 斜面勾配1～4%で流動距離は数百m以上（4か所）
- ✓ 地震後、十秒～数十秒後に流動開始
- ✓ 地震直後に数mもの住宅や地盤の隆起・上下動
- ✓ 地下からの大量の水の噴出（地盤は泥水状で波打ちながら流下）
- ✓ 温水の噴出
- ✓ 水膜や表層地盤への水の流入による流動コンセプトとの整合
- ✓ 津波ともリンクする海底地すべりとの関連

# 流動を引き起こした水の起源：液状化層

## 遠心模型実験（愛媛大学）

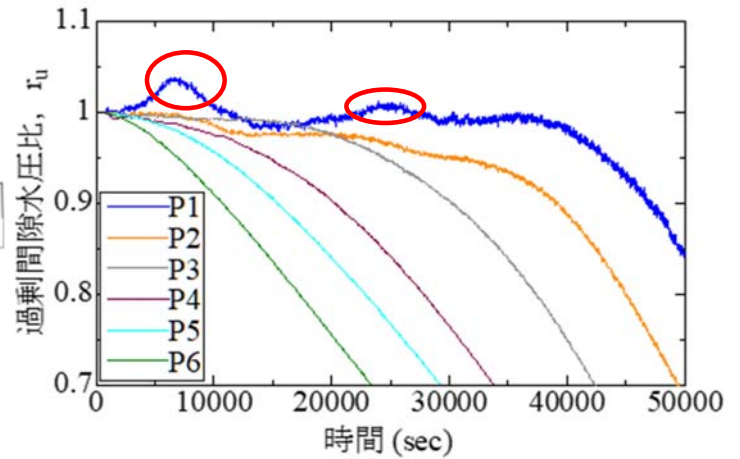
- ・ 地盤層厚6.8m（17cm×40G）の珪砂8号 + 非塑性シルト（FC35%、RL=0.12）
- ・ 傾斜角2度（4度相当のせん断応力）
- ・ 40cSt粘性流体で飽和



液状化させるのに十分な加速度で載荷（ $FL \doteq 0.2$ ）

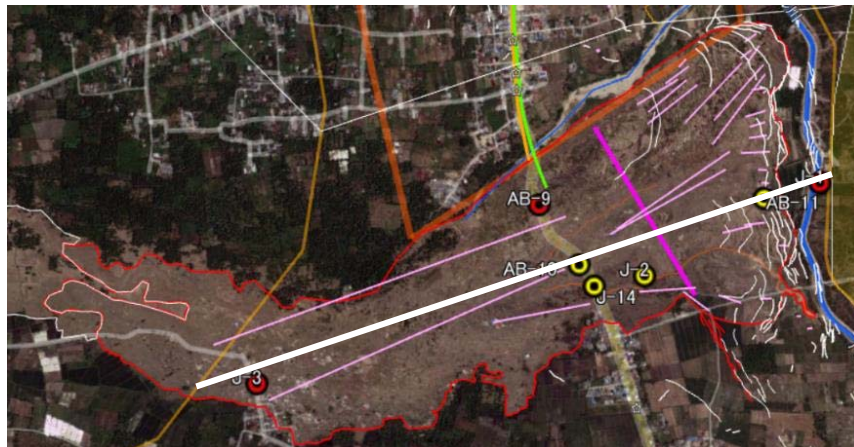
## 間隙水圧挙動

- ・  $t=10-11s$ で全層液状化( $ru \doteq 1.0$ )（表層の水圧計は沈下しその後も $ru$ 増加）
- ・ 40分（深部）～10時間（表層）液状化が継続，深部から順に消散
- ・ 表層では、深部液状化層からの流入により、**一時的な水圧上昇**が確認された。



地表面で加振後から地盤変位5cm増加 → 流動というレベルではない

# 流動を引き起こした水の起源：帯水礫質土層

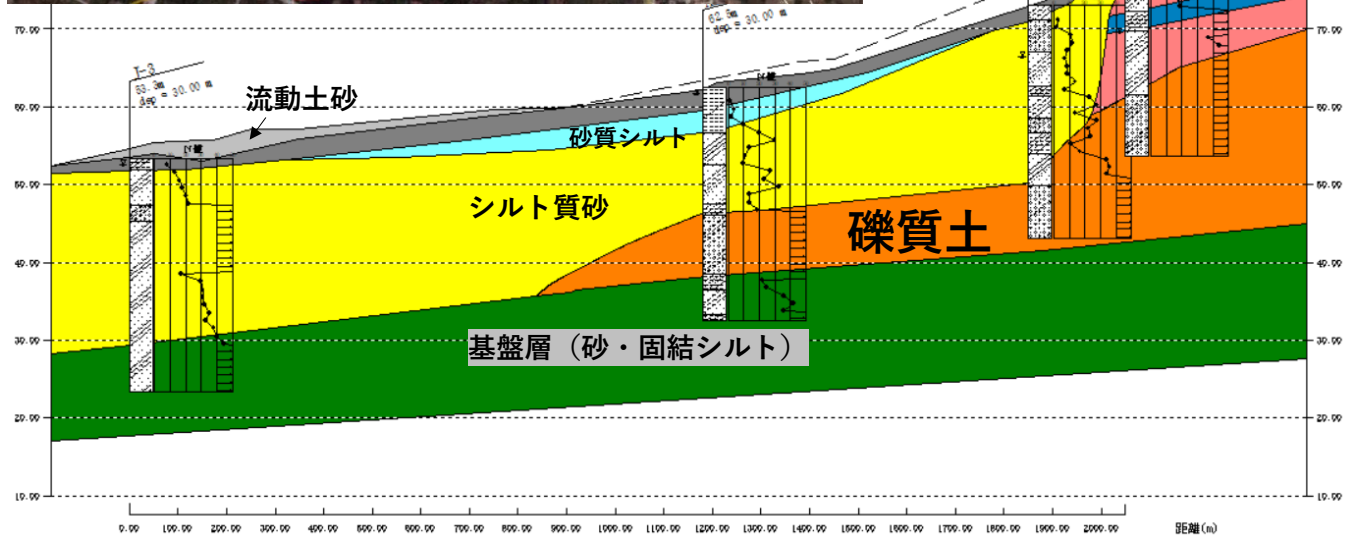


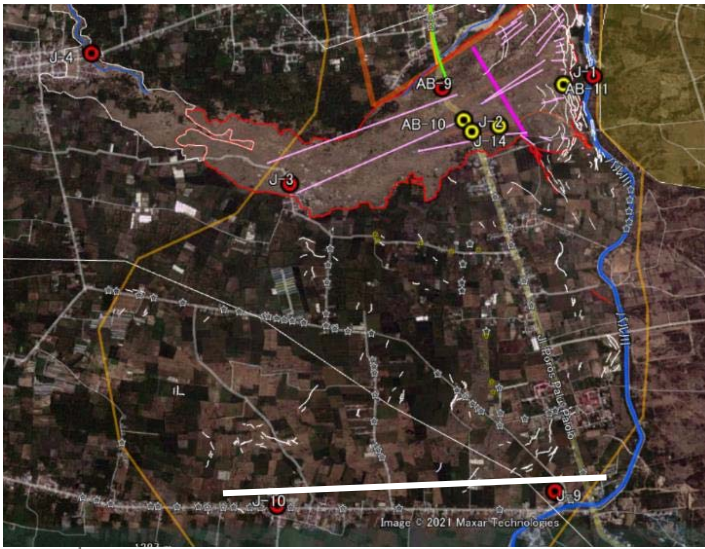
## Jono Oge

帯水礫質土層が流動域内で極端に薄くなる。礫質土層は透水性の低いシルト質砂～砂質シルト層に覆われ、全体に高い被圧が形成され易い構造。

**この地層構造は全ての流動箇所**

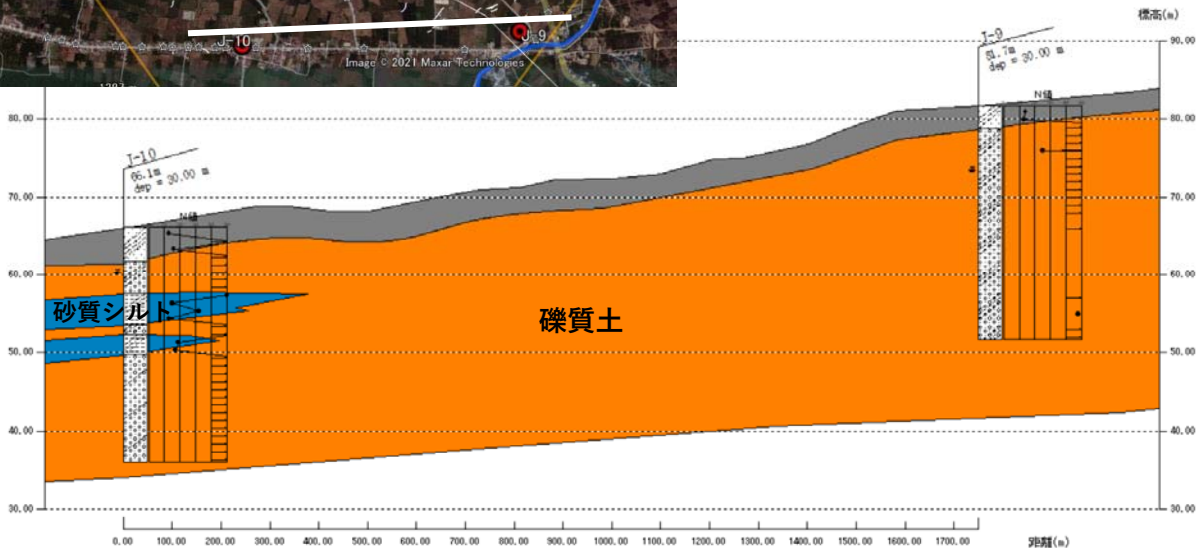
**で共通する**





## Jono Oge 南側の無被害地

被害のない個所の断面では、上流から下流まで厚く礫質土層が分布する。斜面地盤に被圧が形成され難い。



## まとめと今後の予定

### ◆長距離地盤流動の実態把握（現場調査、UAV測量等）

ボーリング・トレンチ・ヒアリング調査→ **ハザードマップ**  
 流動層厚を推定および地盤流動時の様子に関する情報。（地盤の隆起・地すべり上部での噴水、灌漑水路の決壊タイミング等）

### ◆流動メカニズムは概ね理解できた（現場調査、室内試験）

表層地盤の液状化だけでは、その長距離流動を説明できない。地下水の流入を考慮すると、非常に緩傾斜地盤でも流動する。

### ◆問題は水の起源（遠心模型実験、地層断面再検討）

帯水礫質土層が流動箇所では極端に薄くなっている。被圧の形成による液状化の可能性と、地震後の地表への地下水流出を示唆

#### ◆今後の予定

- ・再検討した地層断面を用いた浸透流解析
- ・地震前の地下水環境を考慮した液状化解析
- ・対策工の方針検討

灌漑水路の構造

液状化対策の範囲と深度

常時地下水の制御・モニタリング

**インドネシア液状化研究所?**との連携