

2018年Sulawesi地震による液状化 に起因する大規模地盤流動 ver. 1.4

東京大学生産技術研究所 清田隆・R. F. HIDAYAT
JICA専門家 多田直人・早川潤

調査概要

◆調査期間

2018年10月17日～19日
(3日間)

◆調査対象

以下の大規模地盤流動
が発生した地区を調査

- Balaroa地区
- Petobo地区
- Jono Oge地区

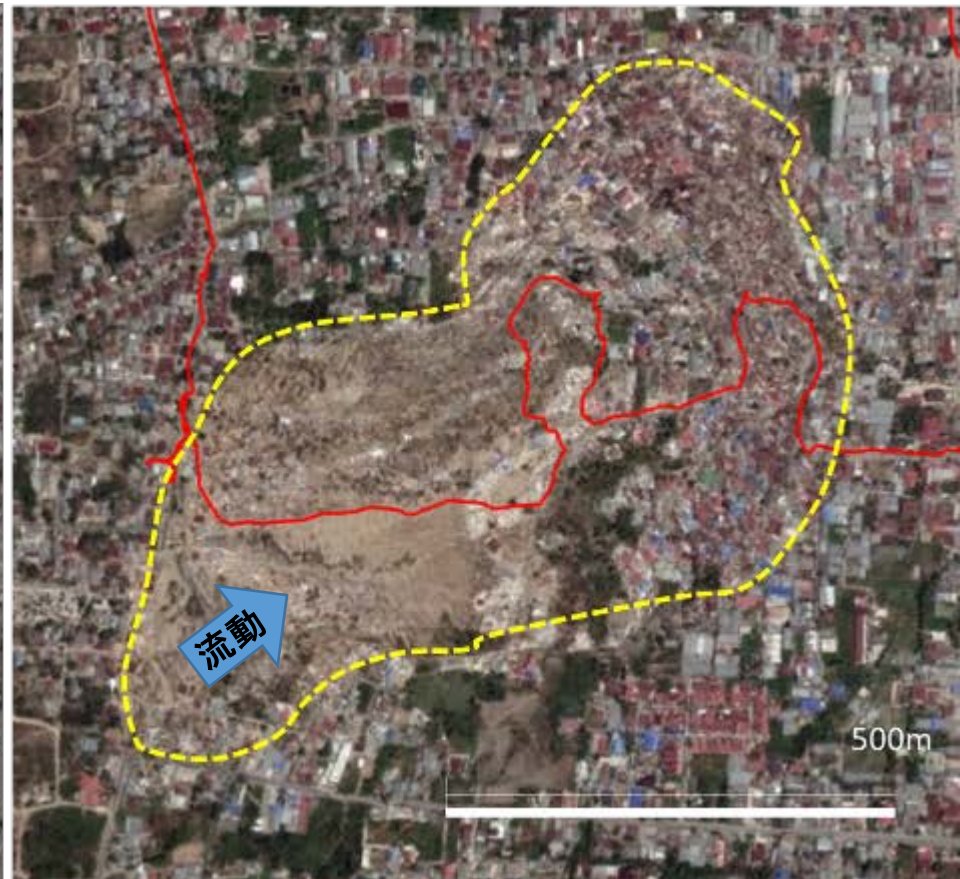


Balaroa

Before earthquake

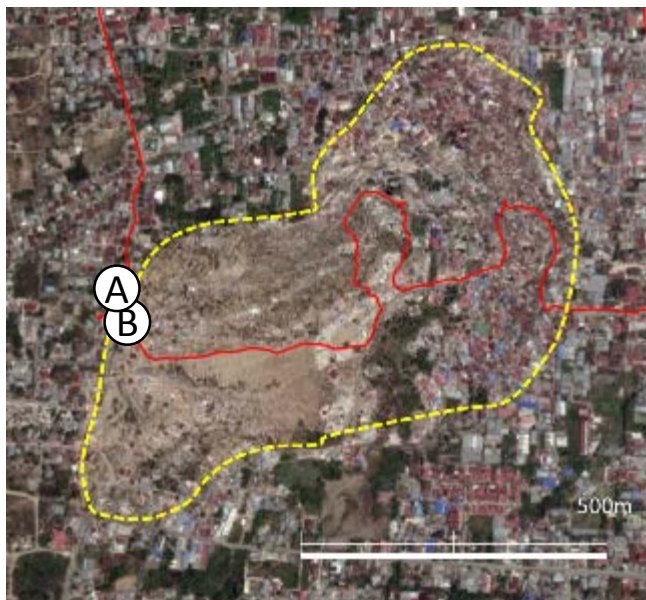


After earthquake



Google Earthによる地表面勾配は平均約3%。3か所の大規模流動被災地の内、人口が最も多いため犠牲者も多い。流動の上部では引張り亀裂・沈下が、下部では圧縮による隆起が生じた。

Balaroa 上部

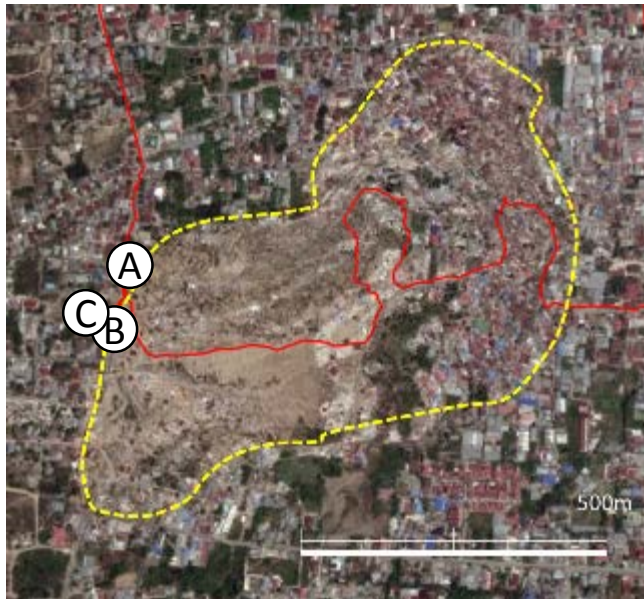


地表面はほぼ乾燥し歩行は可能だが、起伏が激しい。地震から降雨はほとんどないにもかかわらず、大きな水たまりが見える。地震発生時から存在し、地下からの水の供給がある模様



最上部の北側から下流部を撮影：地震前の地表勾配は約2%(Google earthより)。上部の地盤は沈降し、流下。引張が生じた部分では滑落崖(約4m)が認められる。流動した範囲内では健全な状態の建物は認められない。写真右側の道路は、救助活動のため重機が通った跡。

Balaroa 上部



流動上部、北側の家屋で液状化による噴砂の痕跡を確認。噴砂の程度は小規模であった。流動部から連続する小さな亀裂が多数あり、危険。

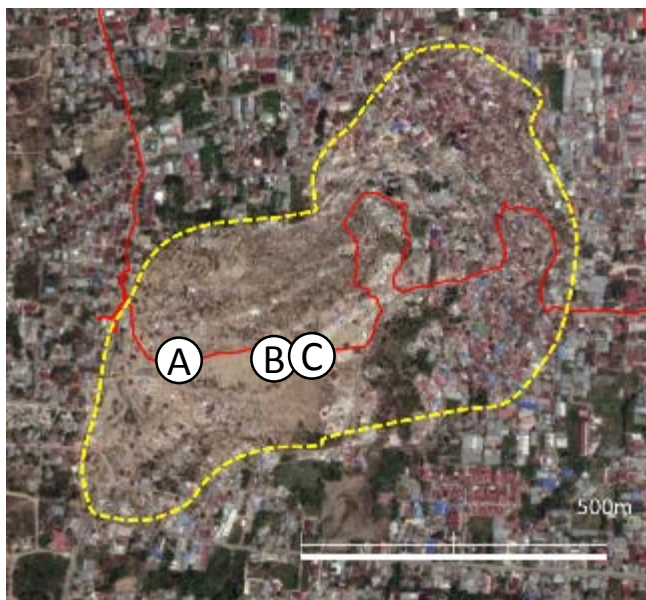


流動の最上部の家屋は、地盤の変状により引き離されて倒壊。地面にも引張り亀裂と数十cmの段差が斜面直交方向に多数生じる。



流動による上部亀裂の範囲から辛うじて免れた鉄塔。基礎や構造、周辺設備には異常は見られない。

Balaroa 中部



流動した後の地表面は起伏が激しい。最上部より水の存在が目立つようになる。今回通過した箇所では、明確な噴砂の痕跡は確認されず

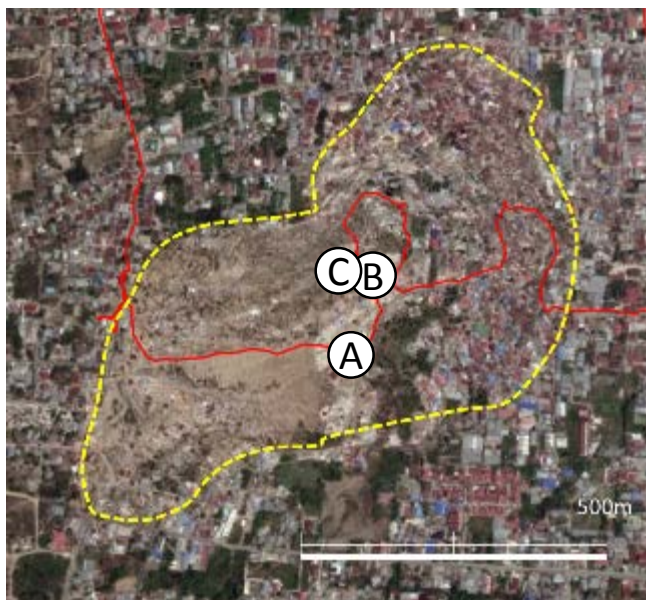


流動範囲の上部南側にあったグラウンドの一部と思われる土塊が数10cmのブロックとなって散らばる。流動距離は200m程度



下流に向かうに従い、地表面は更にフラットになり、水たまりの数も増えていく。地下から水が湧いている個所も見受けられる。

Balaroa 中部



(A)



流動に巻き込まれ倒壊した建物が増える。流動により地盤が圧縮されたことにより、やや地盤高が高くなる。しかし、水たまりの数は多い。

(B)



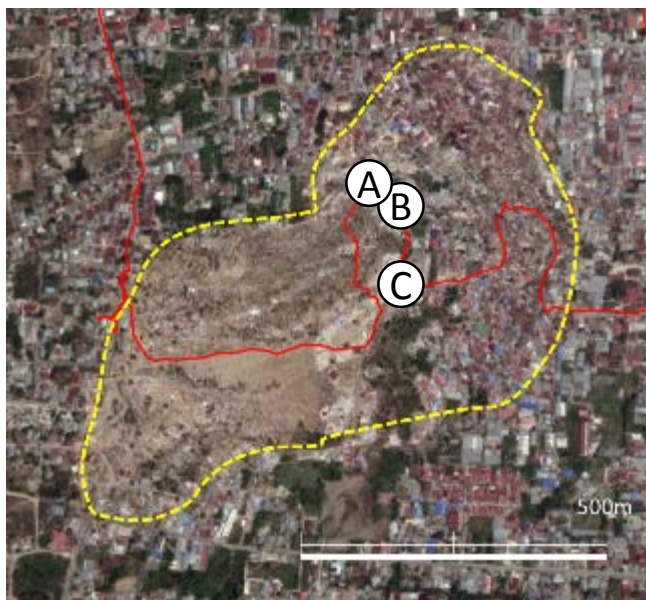
流下・倒壊した小学校の瓦礫。プレートには学年が書かれている。当初の場所から300m移動した模様。

(C)



道路が10m程度の周期で波打つ。地表面高さは、この上部と比べて明らかに高い。

Balaroa 下部



流動部北側の無被害の建物は、流動エリアと比べて高いところに位置する。地震以前からやや比高があった。流動は浅い谷で発生した模様。

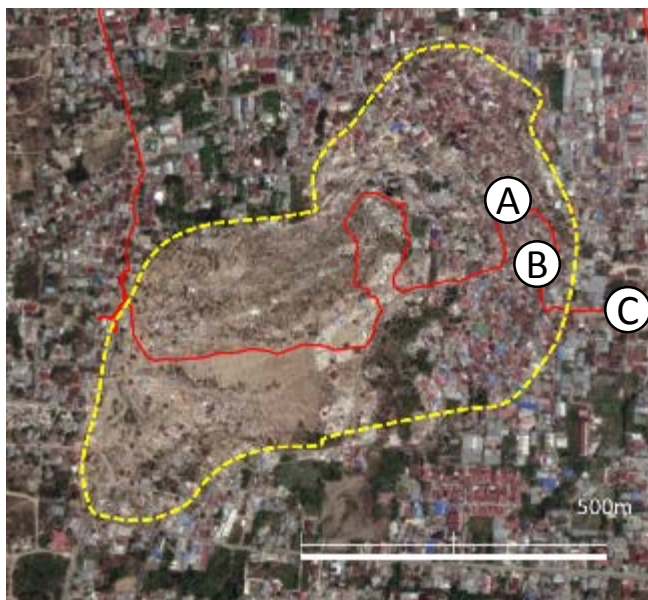


大量の倒壊家屋とその瓦礫。しかし、救出作業のため建物はかなり解体されているはず。地震直後の建物の様子とは異なる可能性がある。



流動の最下部付近、圧縮されてかなり隆起した個所でも豊富な水の存在。ここでも湧水が確認された。

Balaroa 下部



(A)



写真左側の建物は火災の痕跡がある。ガスはプロパンであり、流動時から流動後にかけて引火した模様。同様の焦げた建物は複数確認される。

(B)



流動による圧縮部分の最下部の様子。右側の建物はかろうじて立っている。地表面に残る亀裂は圧縮の痕跡を残す。

(C)



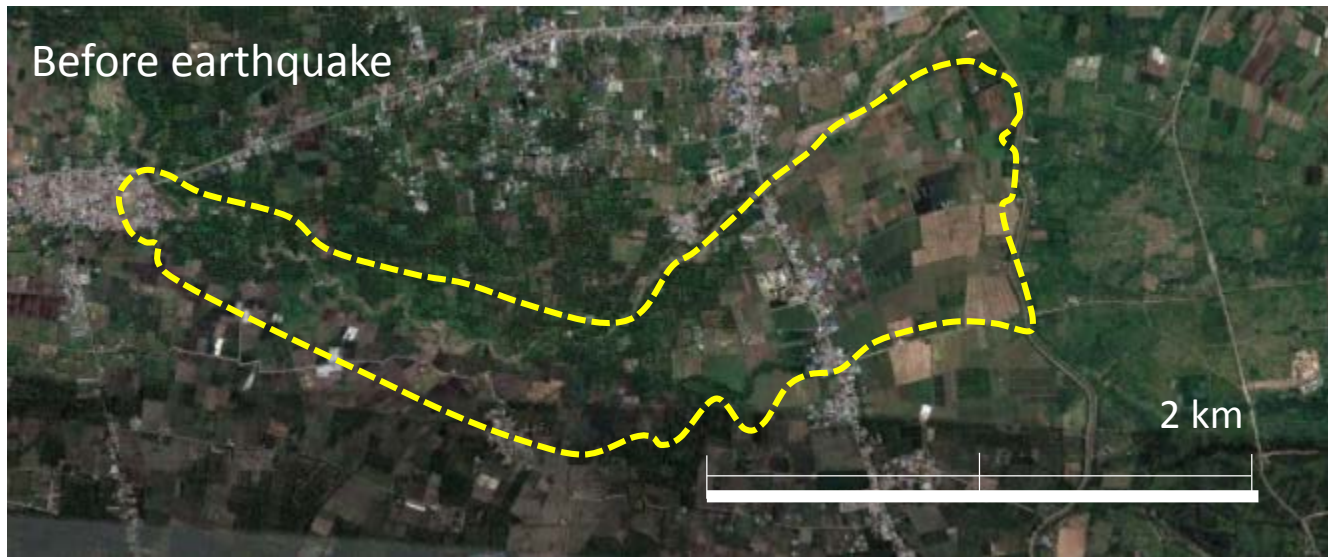
流動の範囲外。古い家屋の倒壊一部あり。噴砂の痕跡が多く見られるが、その規模は小さい。側溝の水量は地震後に増えた証言有。

Jono Oge

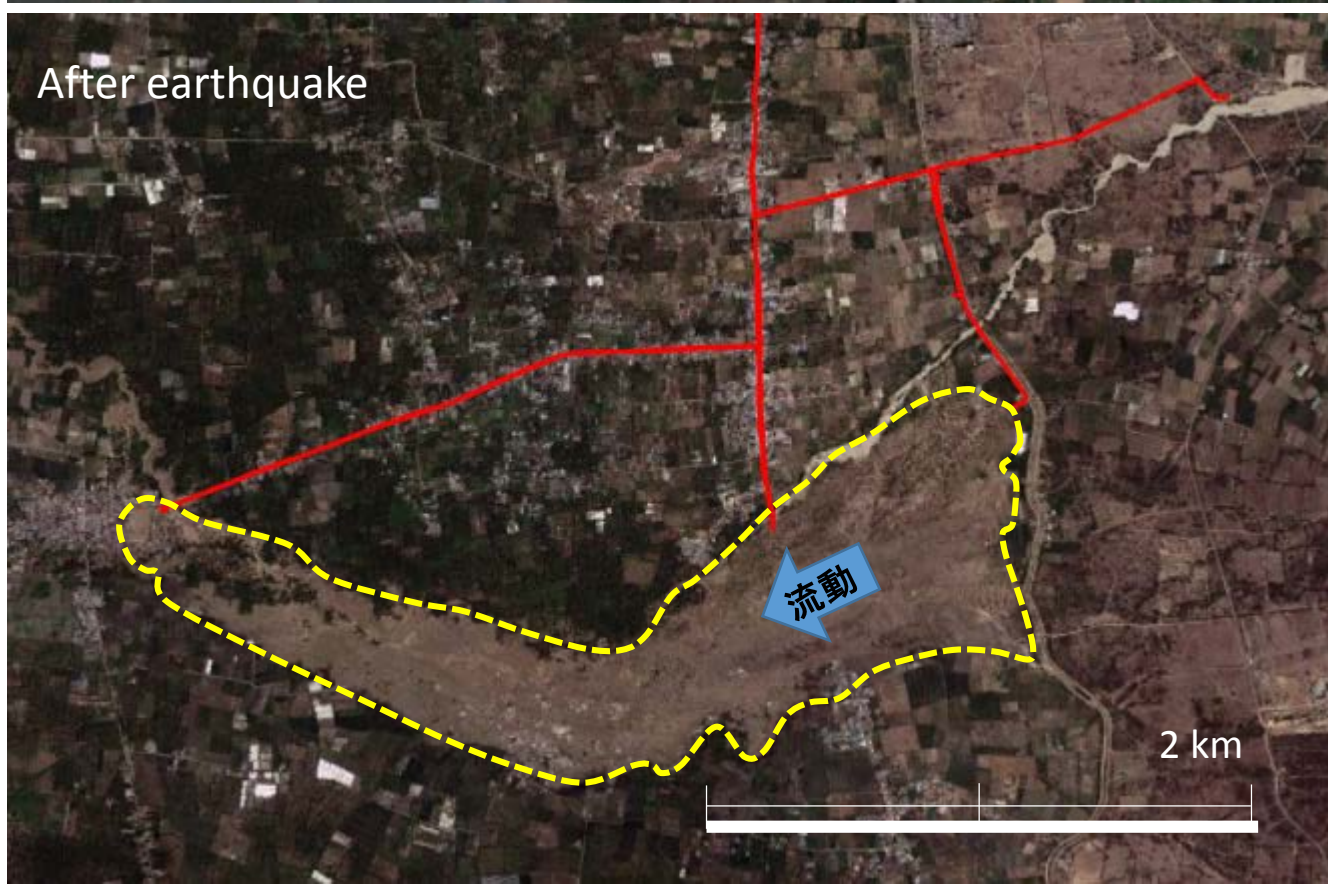
長さ約3km、幅約1kmに亘り流動が発生。Google Earthによる地表面勾配は平均約1%であり、3か所の大規模流動被災地の内最も緩勾配。一方、犠牲者の数は最も少ない。

。流動の直上には灌漑用水があり、この用水路も大きく被災した。下流部では流動化した土砂を含む水が河川を流下し、住宅を浸水させた。

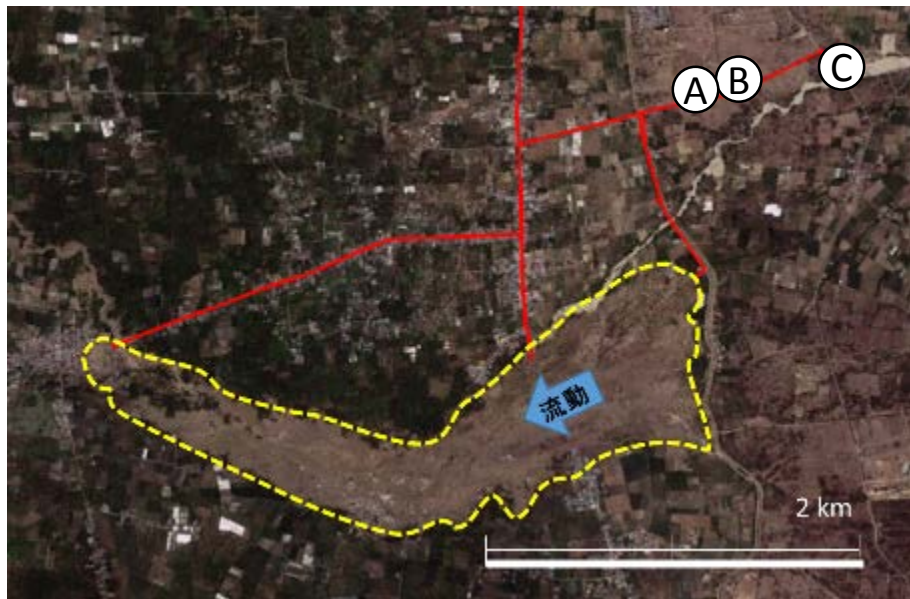
Before earthquake



After earthquake



Jono Oge 上流部



流動部から上部にやや離れた場所は、非常に平坦。植生も流動部とは全く異なる。地盤の透水性が高いと考えられる。

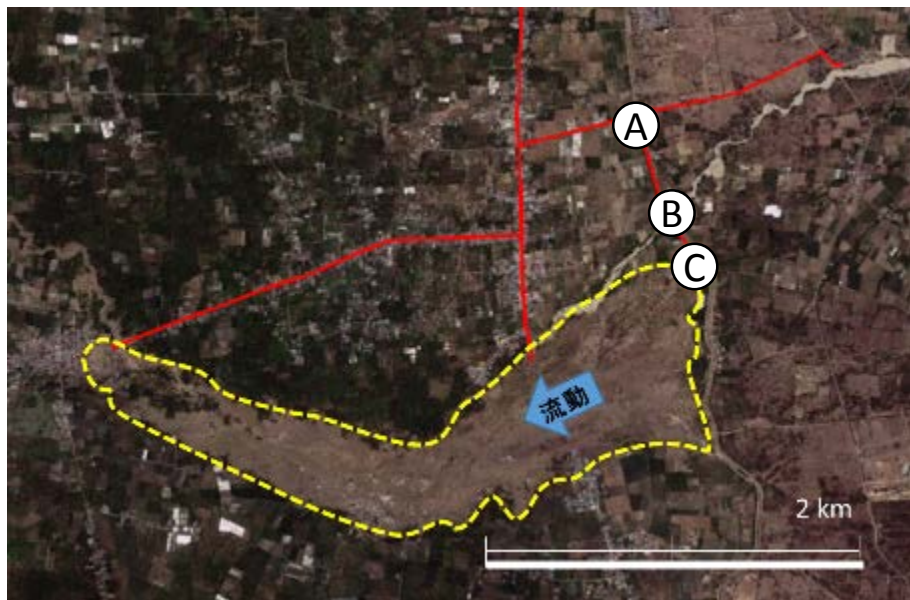


被災者のキャンプ。液状化等の痕跡は全く見られず。多くの谷を有する山が近い割に、河川による地盤の下刻が見当たらない。(橋がない?)



流動部の南側に平行して流れる川の上流部。比較的近くに山が存在するが、雨期のみ水が現れるとのこと。地震時も調査時も水は無し。

Jono Oge 上部



流動部の上部北川の用水路の被害。地震時には水が流れていた。数mの亀裂が河床に沿って伸び、斜面下流側の堤体は沈下。



流動の南側に平行して流れる川。地震時も現在も、この位置では水は無い。用水はコンクリート橋で越えるが、橋に被害は無い。河床に変状なし



流動部の直上にある用水路の被害。噴砂の痕跡あり。用水路の被害は流動とは無関係の可能性もある。

灌漑用水について

- ◆ 今回の地震で灌漑用水は全体的に大きな被害を受けた。
- ◆ 地震時には水があったが、亀裂や決壊により水は浸透・流出
- ◆ 水路は長距離流動箇所の上に位置するが、流動が無い箇所でも水路は損傷しており、必ずしも水路の亀裂＝流動の滑落崖ではない。
- ◆ 水路が1970~80年代に建設されてから、下流部の地下水が高くなり水を採取しやすくなったという証言もある。



Jono Oge 上部



流動の上部の様子。地震前の流動エリアの地表面勾配は約1%で、他の流動地区と比べても最も緩い。最上部では引張亀裂と数mの段差が多数発生している。ここからの目視では地表面に水の存在は確認されず。流動が幅広くかつ長距離に生じたことが伺える。

Jono Oge 中部



流動の中部、北側の境界、上流の水無川の延長である。大きな噴砂の跡が確認される。今回の調査で最大級の噴砂孔



流動の中部を北側の境界から南に向かって撮影。流動は写真に見える範囲全体に左から右へ発生したが、あまりにフラットで想像できないほど。上流の河道には水は無かったが、この位置では年中水が出ているとのこと。地震後からほとんど降雨は無いが、調査時には足が埋まるほど地面はぬかるむ。

Jono Oge 下部



(A)



住民の証言では、地震から約10分後、上流から土砂を含む大量の水が流下し、1時間続いたとのこと。この地域での犠牲者は無し。



(B)

建物に残った土砂の痕跡から、当時は現在の河川水位から約7m上昇した模様。建物に大きな損傷はないが、内部は土砂で埋まったとのこと。

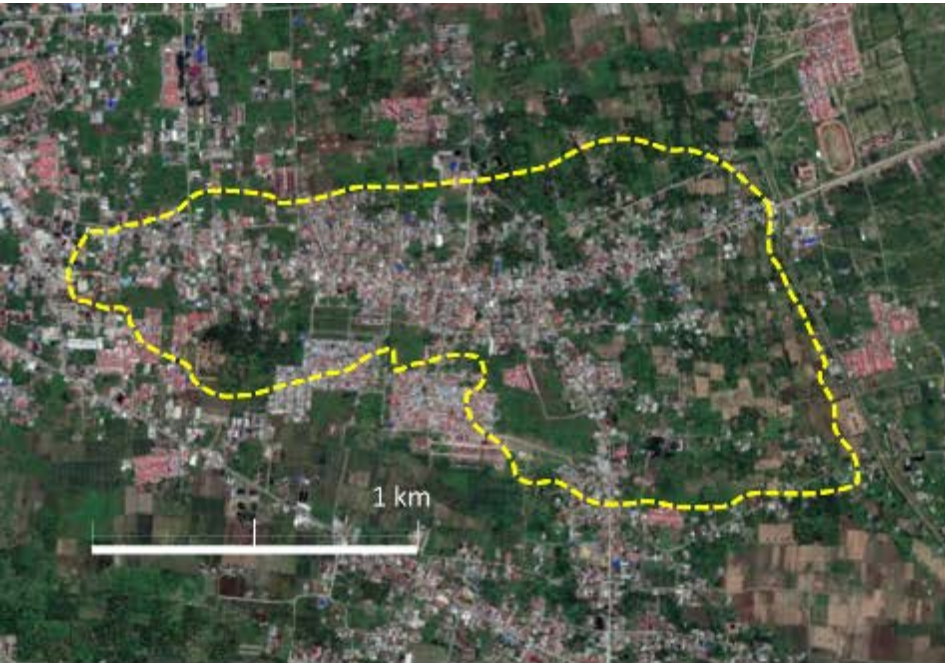
(C)



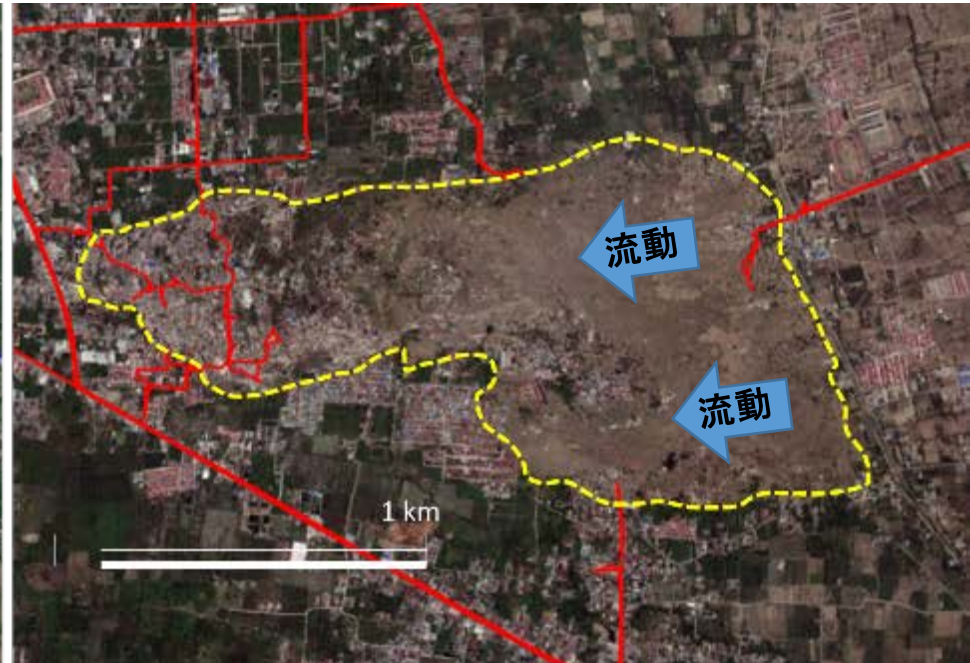
右岸側の橋台の損傷・傾斜は、2016年の洪水で生じたもの。現在はその上に仮設？の橋桁がかかっているが、今回の地震による被害は無い。

Petobo

Before earthquake



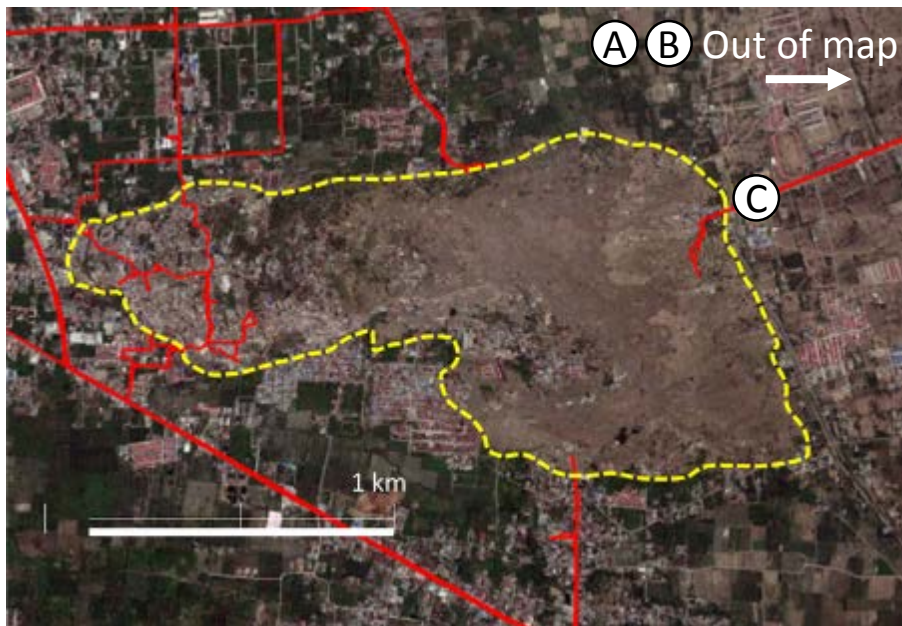
After earthquake



長さ約2km、幅約1kmに亘り流動が発生。Google Earthによる地表面勾配は平均約2%。流動の上部では引張亀裂・沈下が、下部では圧縮による隆起が発生した。今回の調査では、流動エリア内外で簡易動的コーン試験を4箇所実施。

流動の直上には灌漑用水があり、この用水路も大きく被災した。

Petobo 上流部



(A)



Jono Ogeと同様、流動の上部の地域はフラットで乾燥した牧草地。地盤の透水性の高さを示唆する植生が分布。液状化や地震の痕跡はない。

(B)



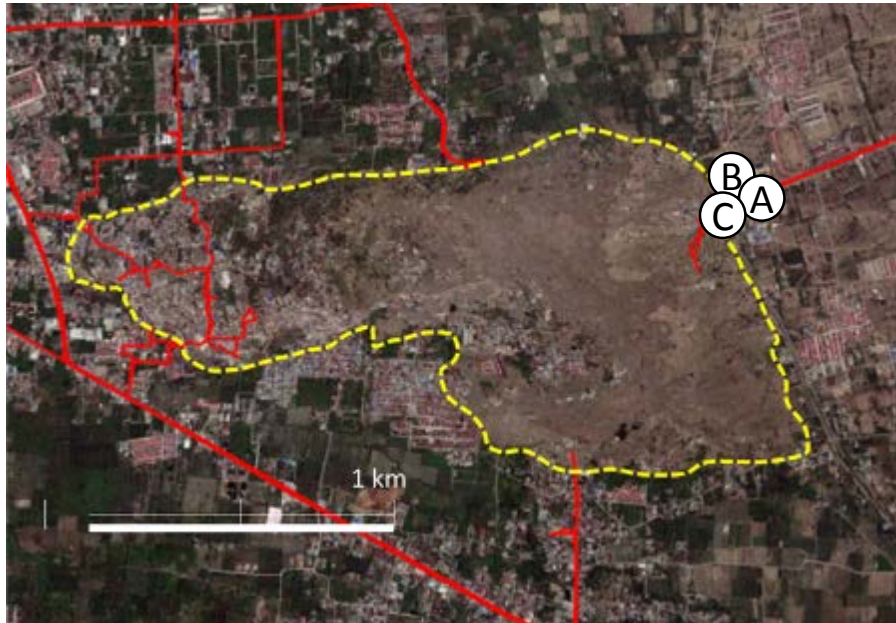
地震動に対し非常に弱そうな構造の建物も、目立った被害は確認されず。

(C)



流動の直上の道路にも亀裂等は確認されず。この付近において、DCPT¹を実施した(結果は後述)。

Petobo 上部



Jono Ogeと同様、流動の上部には灌漑用水が南北にあり、河床に大きな亀裂と下流側堤体の沈下が確認された。

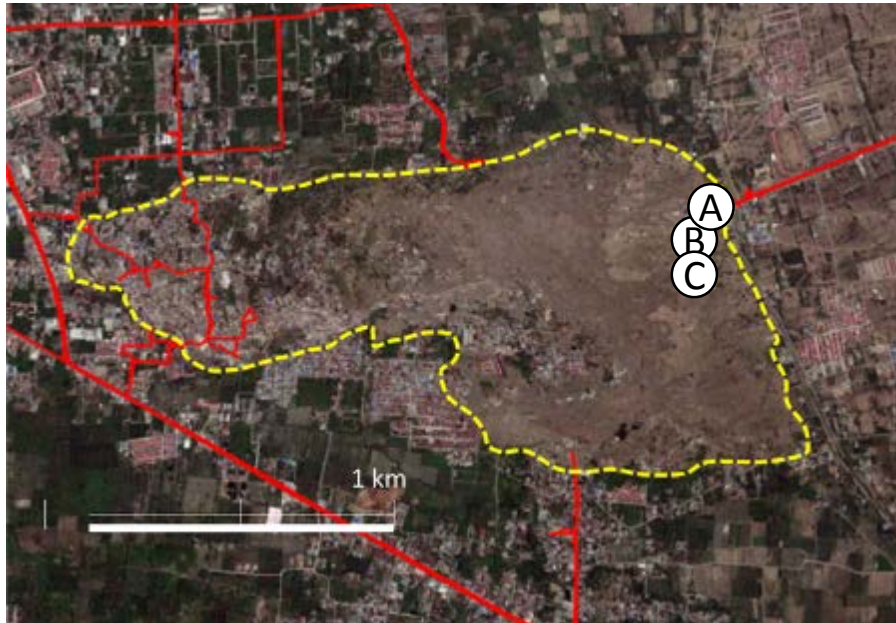


流動エリアの最上部で確認された、引張による多数の亀裂と段差。これらにより建物も大きく変状しているが、倒壊には至っていない。



流動エリア上部の大きな滑落崖背面から撮影。地震前は奥行き方向に道路が伸びていた。地域住民以外にも集まっている。

Petobo 上部



流動上部の大きな滑落崖を降りた位置で撮影。奥行き方向に流動しているが、勾配は非常に緩い。地震前の地表面勾配は約2%程度。



流動に伴う引張り・沈下で生じた滑落崖の高さは約5m程度。ここでは地表面は比較的乾いている。DCPT②を実施した(結果は後述)



上記のDCPT地点よりやや下流部で噴砂と水が浸み出た痕跡を確認。地表面は1~2m程度の高さの起伏が続く。DCPT③と試料採取を実施。

Petobo 中部



流動範囲の北側は湿地帯となっており、歩行困難。上流から圧縮されて地面が隆起した個所も多くみられる。



流動範囲の南側の地盤は比較的乾いている様相。土砂は細粒分を含む砂質土が主体で、上部の噴砂と似ている。家屋は比較的残っている。



南側のエリアは上流から流下した土砂が埋まただけの家屋が目立ち、この場所の地盤の流動は無かった可能性が高い。

Petobo 下部



上流から流下してきた鉄塔(流動距離1100m)。基礎がそれぞれ大きく変位し上流側に倒れている。



圧縮による隆起が数mに達している。証言によると、流下しながら沈下と隆起が繰り返され、それに伴い地盤の亀裂が開いたり閉じたりした模様。



流動部の下流南側の端部の様子。巻き込まれなかった家屋の被害は軽微で、噴砂が確認された。ここではDCPT④を実施。

Petobo 下部



(A)



流動が止まる際に生じた地盤の隆起と沈下、および周辺の建物の被害の様子。建物はバラバラの様相だが、搜索時に解体された可能性も。

(B)



比較的深い水たまりにある構造物。搜索のため周辺を掘削した可能性。水は地下から湧き出ている。

(C)



完全に破壊された建物の瓦礫の中を流れる水。このような地表水の存在が多く確認された。

Petobo 下部



数千名が埋まっているため、消毒薬を散布する様子。既に搜索は打ち切られているため、埋まった死体が地下水に及ぼす影響が懸念される。



流動の末端部の様子。溜まった土砂の高さは約5m程度。土砂から浸み出る大量の水が確認できる。

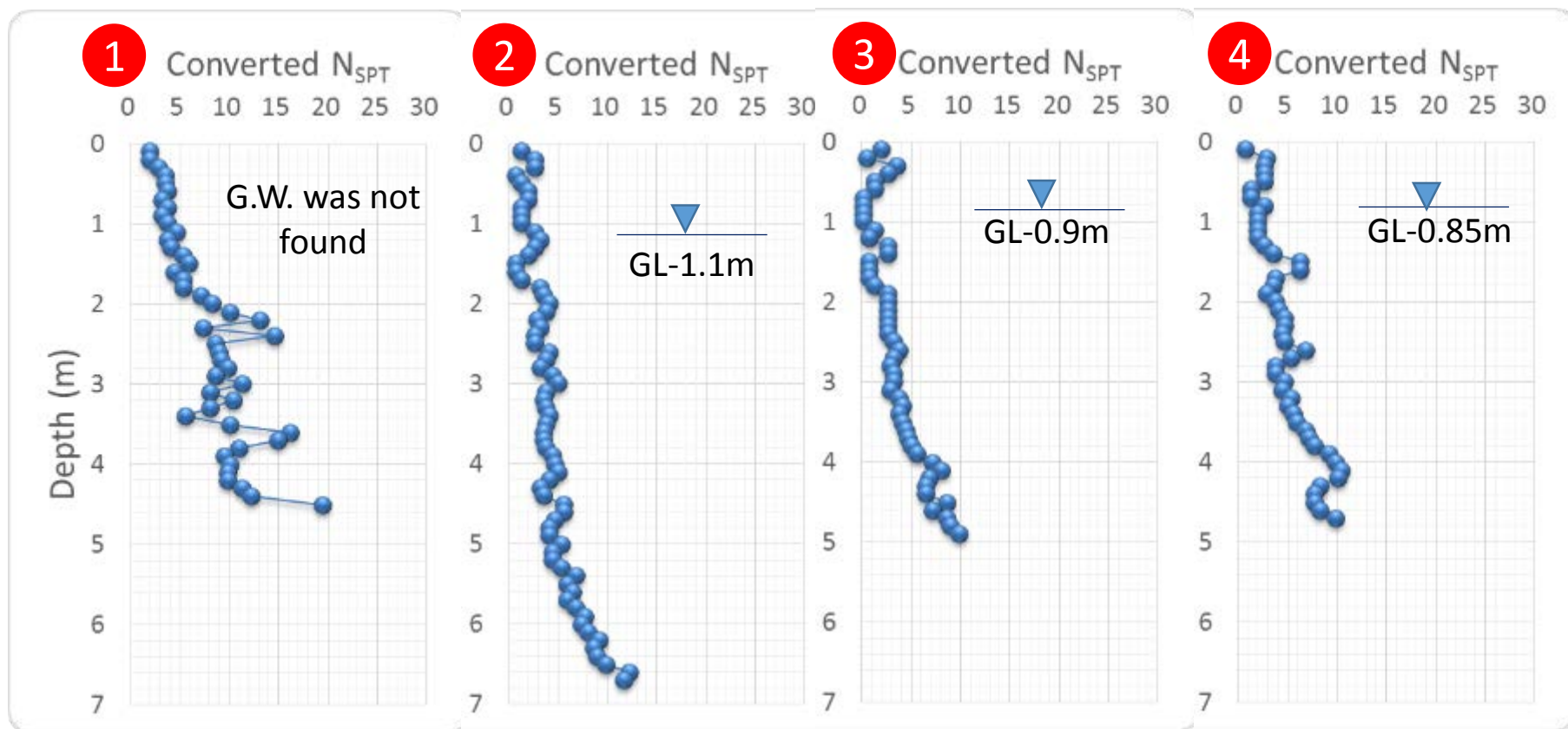


流動の影響を受けていない箇所でも、噴砂の痕跡が多数確認された。



Location of DCPT in Petobo

- ① 流動エリア外： 比較的高い N_{SPT} で地下水位は確認されず。液状化のリスクは非常に低い。
- ②③ 流動エリア上部： $N_{SPT} < 5$ の非常に緩いシルト質砂層がGL-5~6mまで分布。地下水位はGL-1m程度
- ④ 流動エリア下部： 流動土塊の外側で実施したためか、流動で乱された①②より若干高い N_{SPT} 。周辺では噴砂が発生。調査後にロッドを引抜くと地下水が湧出した。



まとめ

Balaroa, Jono Oge, Petobo地区の1~3%程度の緩斜面で発生した長距離流動の調査を実施

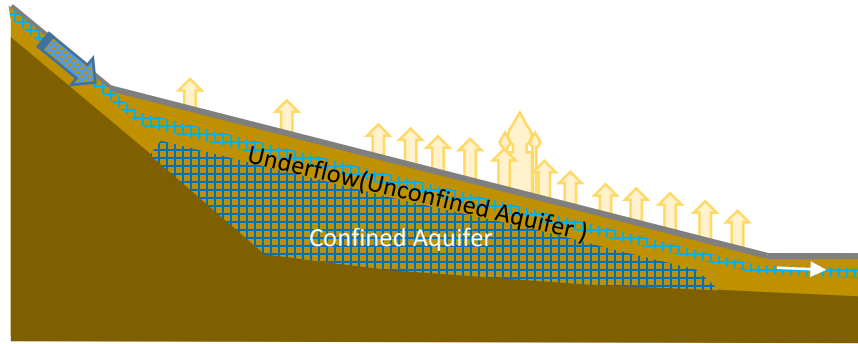
- ◆流動エリア上部に引張り亀裂と数mの沈下が発生。液状化の痕跡も見られる。
- ◆Balaroa, Petoboでは、斜面勾配が緩くなり圧縮が作用した付近で隆起が発生。流されてきた(場合によっては数百m~1km以上)多くの被災家屋がここで確認される(Jono Ogeの隆起エリアは未確認)
- ◆流動エリア上部では比較的地表面は乾燥しているが、中部~下部では水量豊富。湧水もある。常時から被圧を示唆する証言もある。
- ◆Petobo地区のDCPT結果より、流動エリア上部と下部ではGL-5~6mまで $N_{SPT} < 5$ の緩いシルト質砂質土。地下水位はGL-1m前後。流動エリアの上流外側では比較的高い N_{SPT} で地下水位は確認されず。
- ◆Petobo, Jono Oge地区の流動エリアより上流部は乾燥した牧草地であり、地盤の変状は確認されず。川の水も無い(Balaroaの上部は未確認)
- ◆灌漑用水は斜面に直交して大きな亀裂や堤防の沈下が連続するが、必ずしも長距離流動の滑落崖の一部ではない。しかし、灌漑用水により下流斜面の地下水位は高くなったという証言がある。

推定される長距離流動の原因

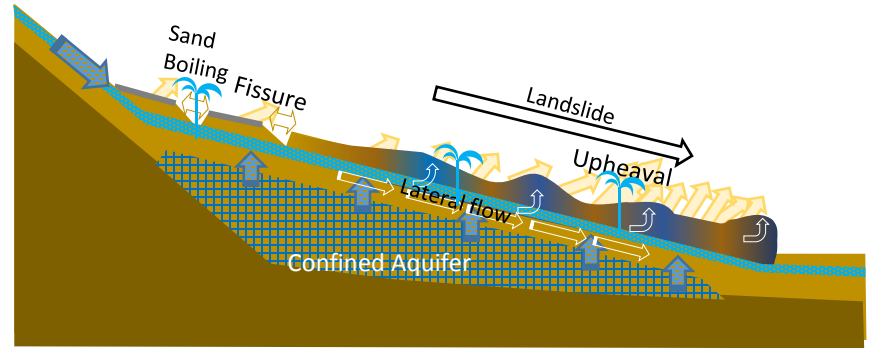
当該緩斜面は緩いシルト質砂層で構成され、その地下水位は背後の透水性の高い牧草地や山地からの被圧を受けていた。そのため、地震時~地震後にかけて液状化状態が継続し、長距離流動が発生した。灌漑用水の存在は当該斜面の地下水位を高く保つ役割をしていたため、液状化の程度も顕著になった。(水膜現象もあったか?)

想定される液状化長距離流動のメカニズム

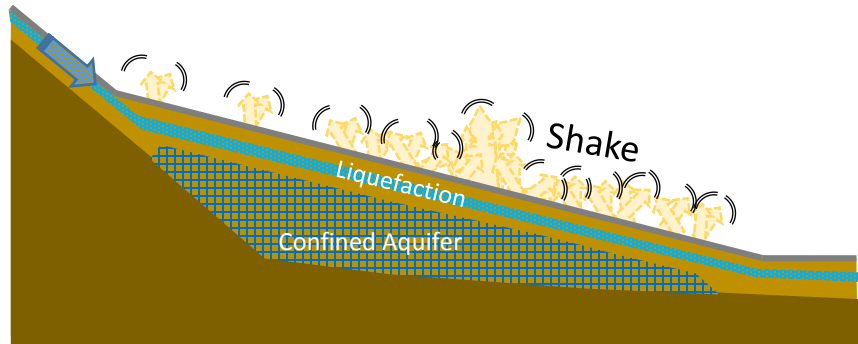
(1)地震前。常時から被圧水が噴出することもあった。



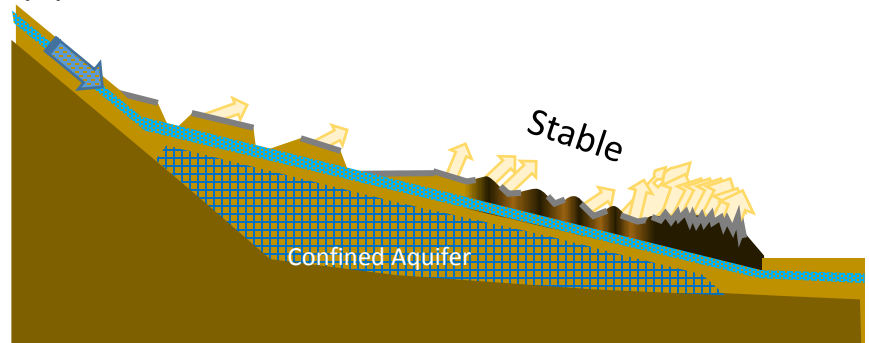
(4) 帯水層からの水圧供給のため、表層の液状化状態が継続し、バランスが取れるまで流動も継続する。法尻部では流速が遅くなり、後方の土砂が圧縮して地盤が隆起。



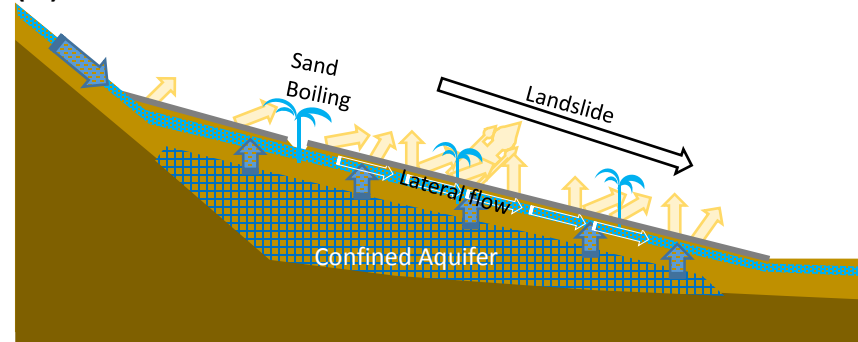
(2) 地震発生。液状化の発生。シルトが多く、被圧水をキャップしていた箇所が乱される。



(5) 流動は安定し、被圧水が地表に浸み出る。



(3) 流動が始まる。噴砂も生じる。



被災した家屋のほとんどがばらばらに破壊されているが、流動によるものか搜索時のものかは判断できず。また、家屋の被害が流動中に起きたか、圧縮時に潰されたかも不明である。

謝辞

- JICA・スラヴェシ島地震調査団の皆様
- Tadulako University Muhammad Rusli先生と学生
- 関東学院大学 東畑先生
- 東京大学 土質／地盤研究室 古関先生・京川先生
- 基礎地盤コンサルタンツ(株) 武政様、柳浦様