液状化による傾斜地盤の遅れ破壊現象

飛田 哲男 ¹・大西 宏実 ²・井合 進 ³ · Agus HIMAWAN⁴ · Arifin BEDDU⁵ · Masyhur IRSYAM⁶ ·

1正会員 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680大阪府吹田市山手町 3-3-35)

E-mail:tobita@kansai-u.ac.jp (Corresponding Author)

正会員 ²基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西支社 技術部(〒564-0051 大阪府吹田市豊津町 12-32) E-mail: onishi.hiromi@kiso.co.jp

³正会員 FLIP コンソーシアム (〒604-0844 京都市中京区御池通東洞院西入仲保利町 185) E-mail:iai.susumu@flip.or.jp

⁴ PT. Promisco Sinergi Indonesiano

Email: ahimawan@promisco.com

⁵ Tadulako University

Email: arifin_beddu@yahoo.com

⁶ Bandung Institute of Technology

Email: masyhur.irsyam@yahoo.co.id

2018 年インドネシア,スラウェシ島で発生した大地震(Mw7.5)により大規模な側方流動がパル市周辺の 数か所において発生した.これらの側方流動は、いずれも傾斜角 1~6%程度の緩傾斜地盤で発生しており、 数百 m~数 km にわたる広範囲の地盤流動により集落が土砂に巻き込まれ多くの方が犠牲になった.もと もと地下水位が浅く、被災後に噴砂跡が確認されたことから、この現象は液状化に起因する流動であると 推測されている.また、地震動が止んでから数分後に流動が始まったという目撃証言から、本現象は液状 化に伴う「遅れ破壊現象」ではないかとも考えられる.本研究では、傾斜に沿った成層構造を有する緩斜 面地盤モデルを作成し、液状化による強度低下を考慮できる 2 次元有効応力解析法により、大規模側方流 動及び遅れ破壊現象の発生メカニズムの解明を試みる.

Key Words: 2018 Sulawesi Indonesia Earthquake, liquefaction, delayed failure, numerical study

1. はじめに

2018年9月28日,18時02分(現地時間),インドネシア,スラウェシ島パル市近郊でマグニチュード7.5, 震源深さ10kmの大地震が発生した.これはスラウェシ島中心部を南北に走るPalu-Koro断層が150kmにわたり左横ずれを起こしたことによる地震動であると推定されている¹⁾. 震源より約80km南に位置するパル市では地震動に伴い大規模な側方流動が数か所において発生し甚大な被害となった. 側方流動が発生したのは、いずれも傾斜角1~6%程度の緩傾斜地域であり、数百m~数kmにわたる広範囲の地盤流動により集落が土砂に巻き込まれるなどして死者2,081人,負傷者4,438人,行方不明者 1,309人という深刻な被害となった²⁾. もともと地下水位 が浅かったという住民の証言や被災後に噴砂跡が確認さ れたことから,この現象は地震動に伴う液状化に起因し た流動であったと考えられている. しかし,液状化によ ってこのように広大な範囲が流動した事例は非常に珍し く,その発生メカニズムは未だ解明されていない. また 地震動が収束したのち数分後に流動が始まったという証 言から,本現象は地震動中あるいは直後に発生する地盤 変形とは異なり,時間経過に伴う応力状態の変化によっ て地盤が破壊状態に至る「遅れ破壊現象」に起因した流 動ではないかとも考えられている³⁾.本研究では,現地 の地盤環境を模した緩斜面地盤モデルを作成し,液状化 による強度低下を考慮できる2次元有効応力解析法によ り、大規模側方流動及び遅れ破壊現象の発生メカニズム の解明を試みる.

2. パル市で発生した緩斜面地すべり現象

パル市において大規模側方流動が発生したのは,平野 の中心部を流れるパル川の東部で4箇所,西部で1箇所 の合計5箇所である⁴⁰.いずれも傾斜角が1~6%ほどの 緩斜面であり,住民らの証言や撮影された動画から,地 震動が収束したのち数分後に地盤流動が始まり,水分を 多量に含んだ泥水状の地盤が上下に波打つように流動し ながら村や水田を飲み込んだ⁹.被害が発生したパル市 域は東西を山に挟まれた盆地になっており,大小さまざ まな扇状地が存在している.今回被害を受けた5地点は いずれも古い扇状地に位置しており,表層はパル川から の氾濫堆積物で覆われ,細砂とシルトの互層が形成され ている.地下水面は浅く,いずれも水田や集落として利 用されていた⁵⁸.

また、大規模な地盤流動が発生した5地点のうちパル 川東部の4地点は、全て灌漑用水路を上端として被害が 発生している⁵. 用水路からの定常的な漏水が周辺地盤 の環境を変化させていた可能性に加え、流動によって用 水路自体が崩壊したことから、地盤への用水の流入が被 害発生の原因となったとの指摘もある. しかしながら灌 漑用水路が存在しない西側の Balaroa 地区でも同様の大 規模地盤流動が生じていることから、流動発生の直接の 要因と断定するには至っていない⁵.

3. 緩斜面の側方流動現象に対する数値解析

本研究ではパル市における大規模側方流動の発生原因 を推定するため、流動被害域の地盤環境の特徴を模した 地盤モデルを構築し、流動現象の再現とその発生メカニ ズムの解明を試みる.まずは、入手可能な地盤情報など から地盤環境の特徴を反映した地盤モデルを作成し、排 水条件下で地震応答解析を行い、地震動収束後、一定時 間経過後に地盤流動が発生する「遅れ破壊現象」が数値 解析で再現されることを確認する.また、その発生過程 を観察し、遅れ破壊現象の発生メカニズムおよび発生原 因を推定する. なお流動発生原因として, 灌漑用水路か らの用水の流入や、流動域の地下水が定常的に被圧され た状態であったことなどが挙げられている.しかし、地 震発生当時に用水路からどの程度の流入水があったか, また被圧地下水の存在範囲等については不明である. そ こで本研究では、灌漑用水路からの流入水や被圧地下水 の影響は解析条件としては考慮せずに、まず第1段階と

して、地層構造のモデル化のみで今回の地盤流動現象の 解析を試みる.

解析手法には、有限要素法による二次元有効応力解析 プログラム FLIP-ROSE(Ver 7.4)^{9,10)}を用いる. 同解析プロ グラムは、支配方程式として u-p formation¹¹⁾を採用し、粒 状体である土の応力ひずみ関係を多重せん断バネモデル、 過剰間隙水圧の発生及び消散とそれに伴う体積変化をカ クテルグラスモデル¹⁰で表現する.

本研究では流動域を模した緩斜面モデルを作成するた め、5地点のうち最も被害が大きい Petobo 地区(図-1) における地盤調査結果¹⁰を参照し、その地層構造を参考 にモデル化を行う.被害を受けた地域は全長およそ2km, 面積は1.4km²であり、流動域の中部から下端部にかけて の居住地域が地盤流動による厚い堆積物で埋まり多くの 人が生き埋めとなった.他の地区と同様、地表面の傾斜 角は約2度と小さく、地震動が収束してから数分後に地 盤流動が始まったことが地元住民の証言からわかってい る.被害が発生した地域では、被災後に複数のボーリン グ調査が実施されており¹⁰、今回はそのうちボーリング 番号BH-P5A¹⁰をもとに地盤モデルを作成する(図-2).

ボーリング番号 BH-P5A から読み取った GL-30m まで の地層構造とN値,細粒分含有率を表-1に示す.図-2お よび表-1より,参照地点の地盤構造はシルト質砂と砂質 シルトの互層となっていることがわかる.これは Petobo 地区以外の被害発生地域においても報告されているパル 市の特徴的な地質構造である.地盤モデルは,このよう な地質構成で緩傾斜する成層地盤を仮定した.作成した 層分割図と有限要素分割図を図-3(a)(b)に示す.

表-1 ボ・	ーリ	ング	BH-P5A12)	から	読み取・	った地層構造
---------------	----	----	-----------	----	------	--------

Layer	Depth G.L. (m)	Soil type	SPT-N	Fines content, F _c (%)
1	0 to -5	Sandy Silt	4	76
2	-5 to -10	Sillty Sand	4	38
3	-10 to -15	Silty Sand	50	71
4	-15 to -25	Sandy Silt	45	70
5	-25 to -30	Sand w/ Gravel	60	70



図-1 Petobo地区の地すべりの状況と本研究で採用した ボーリングの位置



図-2 ボーリング柱状図(BH-P5A)と本研究で設定した地層構成



図-3 層分割図(a), 解析メッシュ(b)

液状化層はGL-5から-10mのN値4, 細粒分含有率38% の層と仮定し, この層にのみ後で述べる液状化パラメー タを設定する. 解析メッシュは GL-15m 以深は 5m×5m, 表層から GL-10m までは流動変形が大きいため深度方向 のみ1m間隔に分割している(図-3(b)). Petobo地区にお ける実際の流動範囲は東西方向2kmに及んでいたが, 今 回は簡単のため 200m の範囲で解析を行う. 住民の証言 などを参考に地下水面は GL-2m に設定した. 地盤の傾 斜角は現地に合わせ2度とする.

各層の地盤パラメータは、表-1のN値、細粒分含有率 と有効上載圧をもとに同解析コードに対応した簡易設定 法¹³により表-2のように設定した.透水係数や各層の有 効上載圧を求める際に必要となる土の単位体積重量につ いては試験結果が公表されていないため、それぞれ石原 14と道路橋示方書 15の値を参考に決定した. なお,砂質 シルトやシルト質砂の粘着力については、現時点で試験 結果が得られていないことから、ここでは全層の粘着力 を 0.0kPa と設定した. 田中ら ¹⁰は Sibalava の液状化層か ら採取した試料に対し非排水繰り返し三軸実験を行い液 状化強度曲線を得ている(図-4).今回はその実験結果 をターゲットとしてダイレタンシー特性パラメータを決 定した. また第2層(液状化層)のせん断強度qusは,既 往の研究 617による非排水強度を参考に決定した.表-3 に同パラメータを、また図-4に実験と本解析による液状 化強度曲線の比較を示す.

解析は、まず自重解析を行い傾斜角に応じた地盤内応 力の初期値を求める.本解析では、地盤の傾斜を表現す るため重力や入力加速度は、斜面に対し平行、垂直方向 にベクトル分解して与える. 次にその結果を引き継いだ 地震応答解析を行う. 地震応答解析の時間は 1,000 秒間 とする. 自重解析, 地震応答解析はともに間隙水の流出 入を許容する排水条件下で行う. 自重解析では底面境界 を固定境界、側方境界は斜面方向を固定、斜面垂直方向 を自由とした.一方,地震応答解析では底面境界を固定 境界、側方境界は、斜面方向の節点自由度は上下流同一 自由度とする循環境界とし、斜面垂直方向は自由とした. 本来、無限長斜面を仮定するのであれば、上下流側の境 界節点は、同一自由度であるべきであるが、このように 設定した理由は、計算の安定性のためである. このため 地盤の変形等については境界の影響が小さい中央部に着 目して考察する.入力地震動は、Balaroa 地区の崩壊位置 に近いインドネシア気象庁の観測点で得られた加速度記 録である¹².本解析ではPetobo地区の流動方向に合わせ EW成分の主要動40秒間を入力する(図-5).

本研究では、緩く傾斜した砂質土とシルト質土の互層 構造が、大規模流動の発生要因となり得るかどうかを検 証するため、それらの透水係数の違いに着目し、表-4に 示すように地盤モデルを Case 1 と Case 2 として地盤の挙 動を比較する.本解析では、いずれも液状化層の透水係数を $k_{san}=1 \times 10^4 (m/s) \ge 1$ 、表層のシルト層(GL.0から-5m)の透水係数を Case 1 では $k_{all}=1 \times 10^6 (m/s)$, Case 2 では液状化層と同じ $k_{all}=1 \times 10^4 (m/s) \ge 1$ る.

表-2 設定した物性値一覧

土層名	第1層 (表層)	第2層 (液状化層)	第3層	第4層	第5層
	GL-0~5m	GL-5~10m	GL-10~15m	GL-15~25m	GL-25~30m
湿潤密度 ρ (g/cm ³)	1.792	1.930	1.792	1.792	1.792
基準初期せん断剛性	44 701	07.015	240.704	224.422	271,881
G _{ma} (kPa)	44,701	87,215	240,764	224,433	
基準体積弾性係数	116 570	227,443	627,874	585,285	709,023
K _{ma} (kPa)	110,575				
基準拘束圧 σ _{ma} '(kPa)	16.32	51.6	82.32	87.91	92.98
拘束圧依存係数 m _G ,m _K	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
間隙率 n	0.621	0.467	0.562	0.562	0.562
内部摩擦角 ϕ f (°)	37.20	41.84	39.92	39.92	39.92
粘着力 c	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
履歷減衰上限値 h _{max}	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
せん断強度 qus (kPa)	-	2.992	-	-	-
透水係数 (m/sec)	10-6	10 ⁻⁴	10 ⁻⁴	10-6	10-4

表-3 液状化層のダイレタンシー特性パラメータ

фр	28.0	q_1	10.0
ϵ_d^{cm}	0.2	q ₂	2.0
r _{ɛ d}	5.0	q ₄	0.5
r_{ed}	1.0	S_1	0.005
r _k	0.5	c ₁	1.0
I _k	2.0	q _{us}	2.99

Case
 1
 2

$$k_{\rm sit}$$
 (m/s)
 1×10^6
 1×10^4
 $k_{\rm sand}$ (m/s)
 1×10^4
 1×10^4







4. 解析結果

(1) 斜面方向変位時刻歴

まず,表層のシルト層を不透水層として設定した Case 1 について,斜面方向の変位時刻歴(図-6(a))をみると, GL-5mをすべり面としてそれよりも浅いシルト層が大き く流動していることがわかる.また流動の発生開始時刻 に注目すると,図中に「EQ end」で示す加振終了時点で の地盤変位は約 lm 程度であるのに対し,加振終了後か ら約 250 秒までは,GL-5m以浅の地盤が一体となって約 4m 変位している.その後,約 250 秒以降ではシルト層 GL4m以浅の表層付近が一体となって大きく変位してい ることがわかる.解析終了時の最大地表面変位は約 37m である.このように加振終了後に徐々に大きな変位が発 生していることから,遅れ破壊現象が再現されていると いえる.



図-6 斜面方向変位時刻歴: (a) Case 1, (b) Case 2

次に、表層のシルト層の透水係数を砂層と同一の値と した Case 2 の解析結果についてみると、図-6(b)に示すよ うに加振終了とともに地表面以外の変位が一定となって いる.解析終了時の地表面変位は約 6m であるが、これ は後で示すように、過剰間隙水圧の消散に伴い間隙水が 地表へ排出されるため、地表面付近の有効応力が低下し 液状化状態になっており、ゆるい傾斜角に従い変位して いるものと推察される.

(2) 平均有効応力時刻歴と過剰間隙水圧時刻歴

次に平均有効応力時刻歴(図-7)について考察する. なお圧力の出力位置は要素中心であり、凡例がGL0mの 場合の出力はGL-0.5mのメッシュ中心位置である.まず 図-7(a)に示す Case 1 についてみると、GL-8m 以深では加 振後に有効応力が回復し、約300秒付近で一定値となっ ている.一方,GL-6m以浅では有効応力はほぼゼロまで 低下していることがわかる. また, GL-3m では, 加振中 に有効応力が上昇し、その後いったん下降するものの 徐々に増加に転じる傾向を示している. この挙動は, GL-5mの有効応力の挙動に類似したものであるが、下部 からの間隙水の流入量が小さいため GL-5m と比較して 有効拘束圧の低下量が小さいものと推察される. このと きの過剰間隙水圧時刻歴(図-8(a))をみると、液状化層 である GL-5m から GL-9m の層では、上昇した過剰間隙 水圧が時間経過とともに一定値に収束している.一方, 表層のシルト層(GL0mから-4m)では、下層の間隙水 圧の消散に伴い、もともと低かった過剰間隙水圧が上昇 し、約300秒付近で一定値となっていることから、砂層 の過剰間隙水圧の消散により間隙水がシルト層へと流入 していることがわかる. また, 砂層のうち GL-7m と GL-9m では,発生した過剰間隙水圧が低下した後一定値に 収束している.これに対し、砂層とシルト層の境界 (GL-5m)では間隙水圧が上昇しつつ一定値に収束して

いることがわかる.このことからも、砂層で発生した過 剰間隙水圧の消散に伴い間隙水が地表面へと移動する途 中で、その上層に位置するシルト層に阻まれ滞留してい ることが推察される.

一方, Case 2 についてみると, 有効応力時刻歴(図-7(b))より, 地表面以外のすべての層において有効応力 が回復している.また, 過剰間隙水圧時刻歴(図-8(b)) より, すべての層の過剰間隙水圧が一定値に収束してい ることから, 砂層で発生した過剰間隙水圧による動水勾 配によって間隙水は滞留することなく地表面へと消散し, 最終的に静水圧として地層全体へ再分配が完了したこと がわかる.解析終了時の残留過剰間隙水圧は約 10kPa で あるが,解析時間を大きくすれば 0kPa に近づくものと 推察される.



(3) 過剰間隙水圧の深度分布

時間経過に伴う過剰間隙水圧の深度方向の推移を確認 するため、図-9に示す解析開始後 300 秒までの過剰間隙 水圧の深度分布について考察する.斜めの破線は初期の 有効上載圧である.まず Case 1 について、図-9(a)より, GL-6m 以深の砂層では過剰間隙水圧が時間経過に伴い消 散し、300 秒時点で深さによらず約 65kPa の一定値を示 している.一方、GL-5m 以浅のシルト層では過剰間隙水 圧は徐々に上昇していることがわかる.このことは、 (2) で述べたように、砂層で発生した過剰間隙水圧が時 間経過に伴いシルト層へと流入していることを示してい る.また、GL-5m においては約 250 秒後に過剰間隙水圧 が初期の有効上載圧にほぼ等しい状態となっており、地 盤が支持力を失っている.このことからも GL-5m の砂 層とシルト層の境界部がすべり面となっていることがわ かる.

次に図-9(b)に示す Case 2 の水圧分布では、加振により 上昇した過剰間隙水圧が、時間経過とともに消散してい ることがわかる.本ケースの場合、過剰間隙水圧消散に 伴う間隙水が層境界に滞留せず速やかに上層に抜けるた め、有効応力が低下せず大きな変位が発生しなかった. ただし、300 秒時点での地表面付近の過剰間隙水圧は約 10kPa となっており、これが地表面の要素に大きな変位 が生じた原因であると思われる.



(4) 有効応力経路

表層のシルト層とその下部の砂層との境界を挟む二つの要素の有効応力経路を、図-10(シルト層)と図-11

(砂層)に示す.まずシルト層についてみると, Case 1 の場合(図-10(a)),層境界上部のGL-5mでは,加振終 了時にはその応力経路は破壊線に到達していないが,せ ん断応力が一定で有効応力が低下し,ある時刻において 破壊線に至っている.これは下層からの間隙水が流入す ることで有効応力が低下し続けていることを示している. この様子は,図-12(a)に示す平均有効応力コンターの時 間推移において,平均有効応力が小さい範囲(青)が砂 層(Layer 2)からシルト層(Layer 1)へと時間経過とともに移 動していることからもわかる.

一方,図-10(b)に示す Case 2 の場合,有効応力経路は 加振中に破壊線に接し,その後約 6kPa 付近で停滞する ものの,時間経過とともに初期値以上に回復している.

次に図-11(a)に示す砂層についてみると、Case1の場合、 有効応力経路は、加振中に破壊線に到達し、その後破壊 線に沿って原点に近づいていることがわかる.一方、図 -11(b)に示す Case 2 でも加振により液状化し、有効応力 経路は破壊線に到達している.しかし、図-10(b)と同様、 時間の経過とともに有効応力は回復している.この時の 平均有効応力コンターの時間推移(図-12(b))から、液 状化により低下した有効応力が、下部の砂層から上部の シルト層に向かって徐々に回復する様子が見て取れる.







図-11 砂層 (GL-6m) の有効応力経路: (a) Case 1, (b) Case 2







なお、確認はできていないが、解析時間をさらに大き くすればシルト層の過剰間隙水圧は消散し、有効応力は 回復するものと思われる.

以上より,表層の透水係数を液状化層と同一の値とした Case 2 では,過剰間隙水圧の消散に伴い間隙水が地表面へ排水されるため,間隙水の蓄積に伴う体積ひずみの増加はなく,それに伴うせん断強度の低下による遅れ破壊現象も生じない.このことから Case 1 のように液状化層の上に透水係数の小さい層が存在していることが,遅れ破壊現象を発生させるための重要な条件であることが示唆される.

5. 緩斜面における遅れ破壊現象および大規模側 方流動の発生メカニズム

4.で述べた解析結果により,緩く傾斜した水平成層を 仮定した場合の遅れ破壊現象の発生メカニズムは以下の ように推察される.地震動により砂層内に発生した過剰 間隙水圧は,土中に動水勾配を発生させ間隙水を移動さ せる.砂層の上にシルト層のような透水係数の小さな層 が存在する場合には,間隙水は地表面への経路が阻害さ れるため,層境界付近に徐々に滞留する(水膜の形成) ¹⁸.このため,層境界付近では地盤が膨張し(void redistribution)¹⁹,それに伴い有効応力が徐々に低下する.

この現象は、図-13 に示す圧縮曲線を用いて説明できる.すなわち、いま液状化層の上に位置する低透水層の 土要素を考えると、この要素に間隙水が流入することで 初期状態(Initial state 上)にある地盤の平均有効拘束圧 p' が低下し初期の圧縮強度 p_{s0} 'に至る.この時の非排水せ ん断強度は q_{s0} である.その後さらに間隙水が流入する と体積膨張が発生し、有効応力経路は Steady state 線を上 方に移動し平均有効拘束圧 p'がさらに低下する.これに 伴い土要素のせん断強度 q_{s} が低下し、重力の傾斜方向 成分 τ_a を下回るとき ($q_{s} < \tau_a$)破壊が発生する.これが、 地震動によって即時的に起こる流動とは異なり、地震動 収束後に流動が生じる、遅れ破壊現象の発生メカニズム として推測されるものである.

一般に斜面における地すべり現象では、重力による傾斜方向のせん断力(тa)が土の強度(qas)を上回った時点ですべりが発生する.しかし、今回のように間隙水の流入によって土の強度が低下し続ける場合は、地震動発生直後は土の応力状態が安定状態にあったとしても、ある時刻において土のせん断強度 qasが重力によるせん断力 Tas を下回り(qas < Tas)遅れて流動が発生する場合がある.



図-13 間隙水の流入による体積ひずみの増大と有効応 力およびせん断強度の低下過程を示す圧縮曲線

以上の考察により、パル市における大規模側方流動の 発生要因が次のように推定できる.

① 流動が発生したどの地区においても地下水が豊富であった.このことから、地震動発生前に存在していた地下水が被圧されていたかどうかに関わらず、地盤が水で飽和していることは、遅れ破壊の発生条件である液状化発生の重要な条件であるといえる。今回被害を受けたパル市では地下水位が浅く、表層の緩い砂層が飽和状態にあったことは、大規模な側方流動が発生した原因のひとつである。

② 砂とシルトの互層という特徴的な地層構造を有していた.今回実施した傾斜角2度の成層構造を仮定した数値解析により,液状化層の上層に透水係数の小さな層が存在する場合,過剰間隙水圧の消散に伴う間隙水の移動,滞留によって緩傾斜面でも流動が生じることがわかった.このことから,パル市においても液状化層である砂層と透水係数の低いシルト層が互層構造となり広く存在していたことで遅れ破壊現象が複数の層かつ広い範囲で発生し⁷,わずか1~6%の緩斜面にもかかわらず傾斜に沿った大規模な側方流動が生じたことが推察される.

今回の解析では、灌漑用水路の存在や被圧地下水の影響を無視しているが、灌漑用水路については、流動が発生した箇所の大部分でコンクリートライニングが施されていなかったことから、水路からの定常的な漏水が周辺地盤の地下水面を上昇させていた可能性は高い.ただし、流動発生の原因は用水路の存在自体ではなく豊富な地下水を含んだ地盤環境にあったとすると、灌漑用水路が無くとも地下水面の高い状態が維持されている環境では同様の流動現象が発生する可能性は十分に高く、Balaroa地

区はその環境を満たしていたものと考えられる. このこ とは Balaroa 地区が過去に水田地帯であったこと,また 扇状地の下端に位置するため元来地下水が溜まりやすい 地形であったことからも推察できる⁹.

6. まとめ

本研究により得られた緩斜面における大規模側方流動 の発生メカニズム,および発生原因に関する結論を以下 に示す.

- 2次元有効応力解析により、液状化に伴う傾斜地盤 の遅れ破壊現象が再現できた.液状化による過剰間 隙水圧は土中に動水勾配を発生させる.通常、この 動水勾配により間隙水は表層へと排水される.しか し、上部にシルト等の透水係数の小さい層が存在す る場合、間隙水は層境界付近に次第に滞留し始める. これに伴い層境界付近の地盤が徐々に膨張し、有効 応力とせん断強度が低下する.ある時点において重 力による傾斜方向のせん断力がせん断強度を上回り 側方流動が発生する.これが遅れ破壊現象と呼ばれ 現象である.
- 2) 灌漑用水路からの漏水の影響,被圧地下水の影響を 考慮しなくても、緩く傾斜した砂とシルトの互層構 造により大規模流動が発生する可能性があることが 示された.このことは、灌漑用水路が存在しない Balaroa 地区においても大規模流動が発生し得ること を示唆している.
- 3) 東西を標高の高い山脈に囲まれ大小様々な扇状地に よって形成されたパル市では、砂とシルトの互層が 広く分布している.地下水面が高い状態にあった地 域においては同様の流動が発生しても不思議ではな いが、大規模な流動が発生しなかった地点もある. この理由は不明であり今後の課題である.

謝辞:本研究は科研費基盤 B(JP18H01523:研究代表者 小野祐輔)並びに(JP20H02244:研究代表者 ハザリカ ヘ マンタ)の助成を受けたものです.

参考文献

- European Commission JRC: Mw 7.5 Earthquake in Indonesia, 28 Sep 2018, https://www.gdacs.org/Public/ download.aspx?type=DC&id=75, 2018 (last access: 2021.3.23).
- AHA Centre: M7.4 Earthquake & Tsunami, central Sulawesi, Indonesia, Situation update No. 13, https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/AHA-Situation_Update-no13-Sulawesi-EQ.pdf, 2018 (last access: 23.3.2021).

- Iai, S. and Tobita, T.: Nonlinear dynamic analyses for evaluating seismic ground deformation—Delayed flow failure, Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Sydney 2021, 2021 (Submitted).
- Mason, H. B., et al.: The 28 September 2018 M7.5 Palu-Donggala, Indonesia Earthquake (version 1.0; 3 April 2019), GEER report, 2019.
- Kiyota, T., Furuichi, H. Hidayat, R. F., Tada, and N., and Nawir, H.: Overview of long-distance flow-slide caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Indonesia, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 3, pp. 722-735, 2020.
- Okamura, M., Ono, K., and Arsyad, A.: Large-scale flowslide in Sibalaya caused by the 2018 Sulawesi earthquake, Soils and Foundations, Vol. 60, No. 4, pp. 1050-1063, 2020.
- 7) Hazarika, H., Rohit, D., Pasha, S, M. K, Maeda, T., Masyhur, I., Arsyad, A., and Nurdin, S.: Large scale flow-slide at Jono-Oge due to the 2018 Sulawesi Earthquake, Indonesia, Soils and Foundations, Vol. 61, No. 1, pp. 239-255, 2021.
- Bradley, K., et al.: Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation, Nature Geoscience volume 12, pp. 935–939, 2019.
- Iai, S., Matsunaga Y., and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and foundations, Vol. 32, No. 2, pp. 1-15, 1992.
- 10) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Viol. 35, No. 3, pp. 360-392, 2011.
- 11) Zienkiewics, O.C. and Bettess, P.: Soil and Other Saturated Media under Transient, Dynamic Conditions, General Formulation and the Validity Various Simplifying Assumptions, in Sold Mechanics – Transient and Cyclic Loads, Jhon Wiley & Sons, 1982.
- 12)Himawan, A.: PT. Promisco Sinergi Indonesiano, 私信, 2019.
- 13) 三上武子,小堤治,中原知洋,井合進,一井康二,川 崎栄久:液状化解析プログラム FLIP のパラメータの 簡易設定法(再訂版)の構築,2011.
- 14) 石原研而: 土質力学第2版, p.72, 丸善出版, 2001.
- 日本道路協会:道路橋示方書(V 耐震設計編)・同解 説, 1990.
- 16)田中涼太郎,岡村未対,小野耕平:2018年スラウェシ島地震での大規模地盤流動域から採取した砂の単調及び繰返しせん断特性,第55回地盤工学研究発表会, 21-11-5-07,2020.
- 17) Ishihara, K. Acacio, A.A., and Towhata I.: Liquefaction-induced ground damage in Dagupan in the July 16, 1990 Luzon Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 33, No. 1, pp. 133-154, 1993.
- 18) Kokusho, T.: Water film in liquefied sand and its effect on lateral spread, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 10, pp. 817–826, 1999.
- 19) Boulanger, R. W., and Truman, S. P.: Void redistribution in sand under post-earthquake loading, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 33, No. 5, pp. 829–833, 1996.

(Received ?) (Accepted ?)

DELAYED FAILURE MECHANISM OF LIQUEFILED SLOPE

Tetsuo TOBITA, Hiromi OHNISHI, Susumu IAI, Agus HIMAWAN, Arifin BEDDU and Masyhur IRSYAM

The 2018 Sulawesi, Indonesia, earthquake (Mw7.5) triggered massive flow slide on very gentle slopes of 1 to 5%. Thousands of casualties and missing persons were reported due to such unprecedented disaster. Although detailed mechanism of the flow has yet been speculative, liquefaction is identified as a possible suspect. In the present study, cause of such a flow slide is numerically investigated using a 2D finite element method (Iai et al. 2011) by simulating the dynamic behavior of the 30 m thick and 200 m long gentle sloping ground (slope angle 2 deg.) of alternating silt and sand layers with the recorded acceleration as an input motion. Flow slide was simulated by varying the permeability of silt (5 m thick) located on top of the saturated loose sand (5m thick). When the permeability of silt ($k_{silt}=1\times10^{-6}$ m/s) is set lower than that of the saturated loose sand $(k_{\text{sand}}=1\times10^{-4} \text{ m/s})$, the surface layer above the boundary between the silt and sand starts to flow long after the ground shaking ended. In total 1,000 sec of simulation, the ground displacement of about 40 m was obtained. Close observation at the boundary elements revealed that the excess porewater pressure is gradually increasing in the silt layer while that in the liquefied layer dissipates. Mechanism of this type of failure has been studied as the void redistribution mechanism during liquefaction (Boulanger and Truman 1996) or the formation of water film (Kokusho 1999), which may cause delayed failure of the gentle sloping ground (Ishihara 1993). Although this study successfully simulates the delayed failure in 2D model, there is a room for further research into seeking causes of the flow slides occurred in specific areas in Palu, Sulawesi, Indonesia.