

水中堆積物の重力流れと凝固・堆積過程の観察

宮本 順司*・佐々 真志**・徳山 領一***・関口 秀雄****

本研究では、沿岸域の土砂流出にともなう急激な地形変化の理解やそれが沿岸環境に及ぼす影響の評価に資するために、水中堆積物の重力流れの流況および凝固・再堆積過程を一連の水槽実験を通じて調べている。水中堆積物の流動ポテンシャルは、堆積物の有効応力の喪失および堆積物の体積濃度の減少にともない顕著に増加することを示した。さらに、PIV を用いて、低濃度重力流れと高濃度重力流れの内部の速度場を観察し、その内部機構の違いを明らかにした。高濃度重力流れの内部では、流れ底部から流動化土の凝固が起こること、凝固領域は底部から上部へ発達していき流れが減速・停止することを示した。

1. はじめに

河口沿岸域の多くは、未固結堆積物で形成されているため、暴波浪、地震などの環境外力の作用により不安定化しやすく、堆積物の重力流れにともなう土砂移動が発生しやすい。堆積物水中重力流れのメカニズムや堆積過程は、重力流れ堆積物（例えばタービダイト）の構造や地層形成過程を理解する上で地層学・堆積学的な観点から着目されてきただけでなく（Lowe, 1982）、海底ケーブルや海岸構造物の被災、津波の発生など防災の面からも着目されてきた（Hampton ら, 1993）。近年、沿岸域における急激な地形変化や沖合への土砂流出にともなう海岸侵食、赤土の流出にともなうサンゴ礁の被害など、海岸環境保全の面からも堆積物重力流れの理解が重要となっている。

このような観点から、土粒子群の動的相互作用や有効応力の喪失/回復など複雑な現象が絡み合う、堆積物重力流れの内部機構を明らかにし、不安定化した大量の土砂がどこから運ばれてどこに再堆積するのかを予測することは今後重要となる。筆者らは、地盤液状化にともなう高濃度堆積物重力流れの発達から停止までの一連の過程を予測する手法を提案してきた（Sassa ら, 2003）。その特徴は、堆積物全体を流れ領域と凝固領域で構成し、ナビエ・ストークス式と弾塑性圧密式の二相系で構成していること、両式を結ぶために流れ領域と凝固領域の間に、有効応力はゼロであるが僅かに剛性をもつ遷移境界層を導入し、液状化土が凝固しえるようにしていることである（図-1 参照）。本解析法では、重力流れ内部において発生、発達する堆積物の凝固の結果として流れは減速・停止し、ビンガム降伏値などの複雑なレオロジー特性を導入しなくても有効応力の考え方で、重力流れの過程を表現することができる。

本研究の目的は、堆積物重力流れの内部機構を水槽実

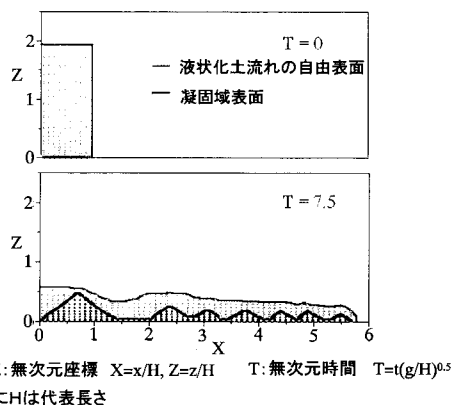


図-1 高濃度堆積物重力流れと凝固領域の発達過程の予測結果（Sassa ら, 2003）

験により観察すること、および実験結果をもとに上述の堆積物重力流れ解析法の検証・高度化につなげていくことである。具体的には、堆積物重力流れを高速 CCD カメラによって観察し、PIV（Particle Image Velocimetry）を用いて画像解析することにより、重力流れ内部の粒子群の堆積や流れの凝固過程を詳しく観察した。

2. 実験概要

実験に用いた重力流れ再現水槽を図-2 に示す。可動壁で仕切られた堆積物を開放することによって重力流れを発生させることができる。このような重力流れの発生方法は、実験室で密度流を発生させる場合の従来からの一般的な方法である（Kneller・Buckee, 2000）。本研究で用いた水槽が従来の研究で用いられてきたものと異なる点は、制御可能かつ高速可動の鉛直可動壁を用いて重力流れの発生を再現性あるものになっている点、ポンプを用いて所定の強さの上向き浸透流を砂地盤に発生させ、重力流れ発生前の地盤の状態としての固体状態/液状化状態/流動化状態/浮遊状態の制御を可能としている点である。重力流れの内部機構を観察するためにマクロレンズを搭載した高速 CCD カメラを使用した。流れ内部の情報を詳しく観察する目的から撮影範囲を小さくした

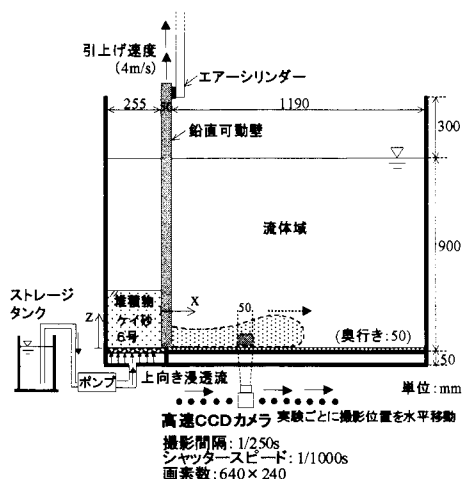
* 正会員 博(工) 基礎地盤コンサルタンツ(株) 関西支社技術部
** 正会員 博(工) (独法) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部
*** 修(工) (株) ビーエス三菱
**** フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所

ため、撮影箇所を変化させて同一の実験を繰り返し実施し、流れ全体の画像情報を得た。砂粒子群をトレーサーとしてPIVによりCCD画像を処理することにより、重力流れ内部の土粒子群の速度場を可視化した。Eckartら(2003)は、PIVを用いて乾燥砂の重力流れの速度場を可視化している。

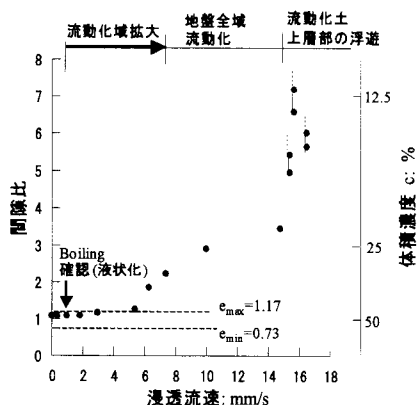
実験に用いた砂は、ケイ砂6号(土粒子比重 $G_s=2.65$ 、平均粒径 $D_{50}=0.32$ mm、最大間隙比 $e_{\max}=1.17$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.73$)である。水路の底面境界の条件を整えるため、水路底面にはあらかじめ約5 mmの厚さのケイ砂6号を敷いた。なお、PIV画像処理ソフトとして、木村ら(2001)によるKUPiv_v1を使用した。

3. 堆積物の状態と重力流れの流動ポテンシャル

本節では水中堆積物の流動ポテンシャルが、重力流れ



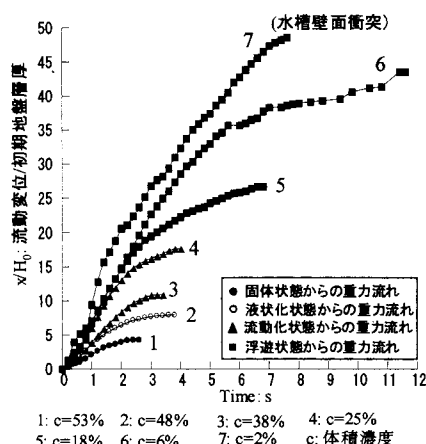
図一 本研究で用いた重力流れ再現水槽



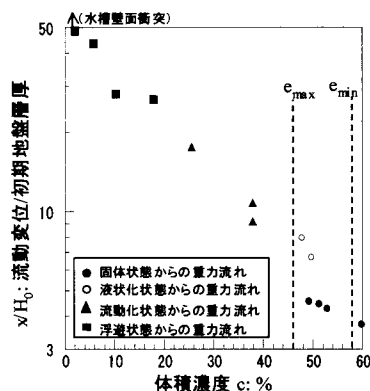
図一 浸透流速の増大にともなう砂地盤の平均間隙比の増大と地盤の状態変化

発生前の地盤の状態(固体状態/液化状態/流動化状態/浮遊状態)に応じて顕著に変化することを示す。これらの地盤状態の変化を把握する目的で、簡易な砂柱の浸透実験装置を用いて、上向き浸透流速と地盤状態の変化との関係を調べた(図一3)。浸透流速の増大とともに、砂地盤は固体状態から液化状態を経て流動化状態へと遷移し、さらに流速を増大させると粒子の一部は浮遊を開始した。地盤状態の変化にともない、間隙比が急激に増加(体積濃度が減少)している。ここで、液化状態とはまさに有効応力を喪失した時の状態で、固体状態と流動化状態の境界の状態である。流動化状態は砂地盤の体積が膨張するものの砂粒子が上昇し続けずにその状態を保っている状態である。砂粒子の粒径が均一でない場合、流動化状態と浮遊状態とを明確に区別することが難しいが、図一3よりケイ砂6号の場合は全体の平均体積濃度が20%程度にまで減少したときに浮遊を開始することがわかる。

流動前の地盤状態の違いによる重力流れの流況パターン



図一 流動前の地盤状態の違いによる重力流れの流況



図一 流動前の堆積物の体積濃度と重力流れの無次元流動距離との関係

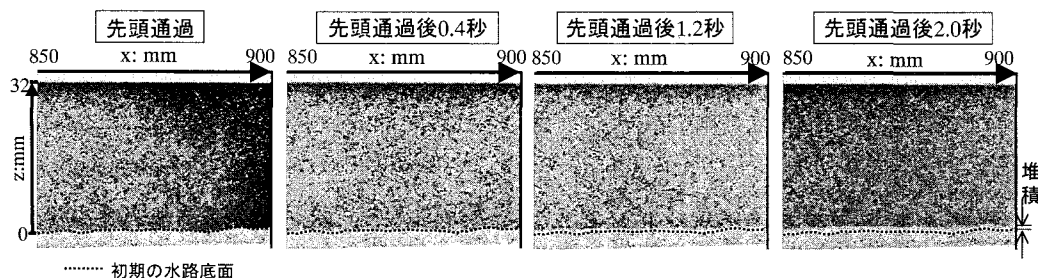


図-6(a) 代表地点での異なる4時刻における低濃度重力流れのデジタル画像

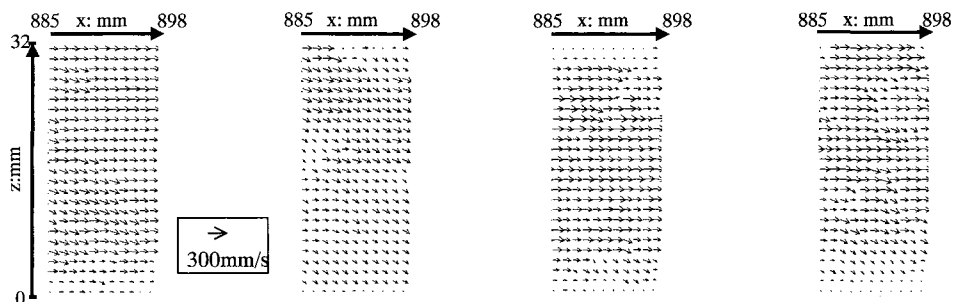


図-6(b) 代表地点での異なる4時刻における低濃度重力流れの内部の速度場 (PIV 適用)

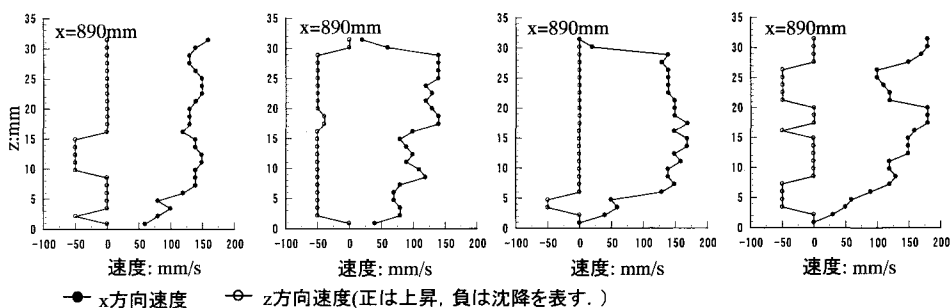


図-6(c) 代表地点での異なる4時刻における低濃度重力流れの内部の速度分布

ンを図-4に示す。重力流れの無次元流動距離は、固体状態からの重力流れ、液状化状態からの重力流れ、流動化状態からの重力流れ、浮遊状態からの重力流れの順に顕著に増加していくことがわかる。この点を、重力流れ発生前の堆積物の体積濃度を用いて考察する(図-5)。同図には図-4の結果に加えて他の実験結果も示してある。固体状態からの重力流れと液状化状態からの重力流れを比較すると、体積濃度がほとんど減少していないのに流動距離が急増していることがわかる。一方、液状化状態から流動化状態、浮遊状態の重力流れに関しては、体積濃度の減少にともない流動距離が顕著に増加している。このことから、重力流れの流動ポテンシャルは、堆積物が有効応力を喪失することによって増加し、有効応力喪失後は、体積濃度の減少にともない増加していくといえる。

4. 低濃度重力流れと高濃度重力流れの内部機構の観察

本節ではPIVを用いて、浮遊砂状態(体積濃度=2%)から発生した低濃度重力流れと流動化状態(体積濃度=38%)から発生した高濃度重力流れの内部の速度場を観察し、その内部機構の違いを明らかにする。

(1) 低濃度重力流れ内部における粒子の堆積過程

重力流れ先頭通過時から異なる4時刻における代表地点($x=850-900$ mm)の低濃度重力流れのCCDカメラ画像、速度場および速度鉛直分布を図-6(a)~(c)に示す。重力流れが低濃度であるため、先頭通過後2秒の間には再堆積層の厚さはわずかに増加した(図-6(a))。内部の速度場を調べてみると、粒子群が流れ方向(x 方向)に速度を持つとともに、鉛直下方向($-z$ 方向)にも速度をもち、粒子を徐々に堆積させながら流れていることがわ

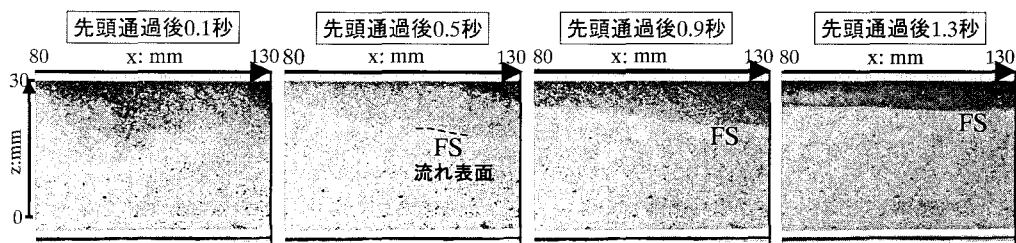


図-7(a) 代表地点での異なる4時刻における高濃度重力流れのデジタル画像

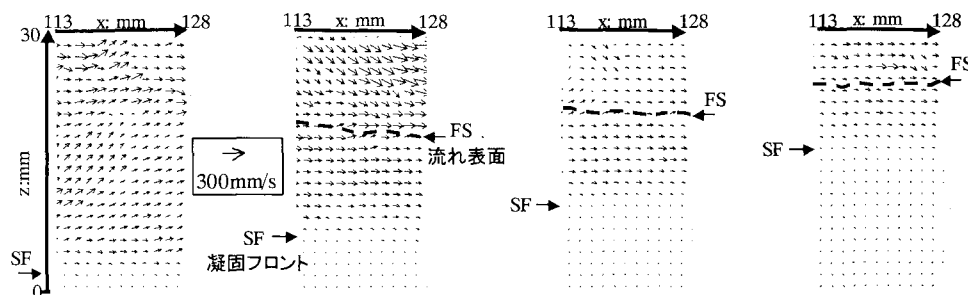
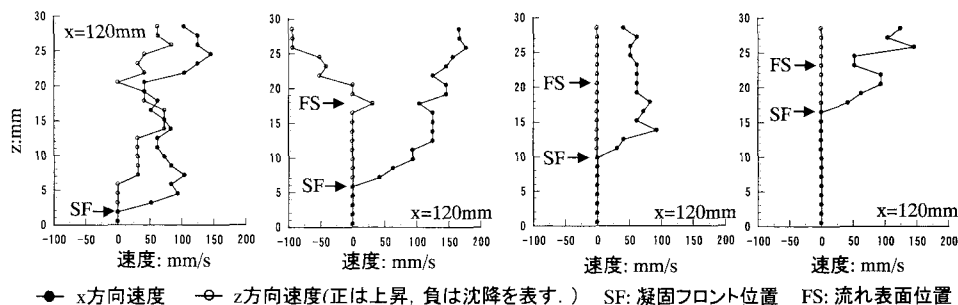


図-7(b) 代表地点での異なる4時刻における高濃度重力流れの内部の速度場 (PIV 適用)



● x方向速度 ○ z方向速度(正は上昇, 負は沉降を表す。) SF: 凝固フロント位置 FS: 流れ表面位置

図-7(c) 代表地点での異なる4時刻における高濃度重力流れの内部の速度分布

かる (図-6(b), (c)).

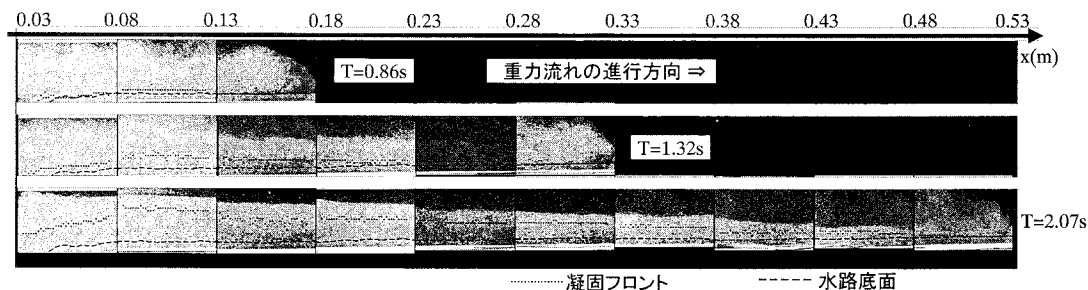
(2) 高濃度重力流れ内部における進行性凝固過程

重力流れ先頭通過後から異なる4時刻における代表地点 ($x=80-130$ mm) の高濃度重力流れの CCD カメラ画像, 速度場および速度鉛直分布を図-7(a)~(c)に示す. 先頭通過から0.5秒後に流れ表面 (FS) がおよそ形成され, 徐々に明確になってくることがわかる (図-7(a)). PIV を用いて内部の速度場を観察すると, 粒子全体は流れ方向および鉛直方向に速度を持って移動しているが, 流れの底部から徐々に固まっていることがわかる (進行性凝固過程) (図-7(b)). この凝固領域の上端が凝固フロント (SF) であり, 流れ表面 (FS) とは異なる面である. 粒子群の鉛直・水平速度分布に当該時刻における凝固フロント位置と流れ表面位置を重ねると以下のことがいえる (図-7(c)). 高濃度重力流れ内部は, 流れ表面が形成された後, $0 < z < SF$, $SF < z < FS$, $FS < z$ の3つの領域で特徴づけられる. $0 < z < SF$ の領域は, 鉛直速

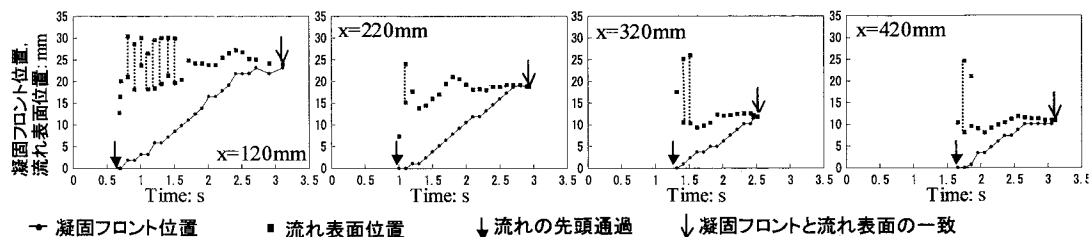
度, 水平速度ともにゼロでありすなわち凝固領域である. $SF < z < FS$ の領域は, 鉛直速度はゼロであり粒子は水平方向のみに移動する. 水平速度はSFから離れるにつれ増加していく傾向にある. $FS < z$ の領域は, 流れ表面より上の領域であり, 粒子は低濃度重力流れ内部の粒子群と同様に水平・鉛直方向に速度をもつ.

高濃度重力流れにおける進行性凝固過程を水路縦断方向に観察したものを図-8に示す. 本図は, PIV によって得られた各時刻各地点における凝固フロント位置を CCD 画像に埋め込むことによって作成した. 流動開始から0.86 s 経過した時点ですでに, 重力流れ底部に薄い凝固領域が発達している. その後, 凝固領域は底部から上部へ発達していくとともに, 重力流れが x 方向に進展していくにつれて, その底部において凝固領域が発生し発達していくことがわかる.

代表4地点における凝固フロント位置と重力流れ表面の位置の時刻歴を図-9に示す. 重力流れの先頭通過後



図—8 高濃度重力流れの進展にともなう凝固フロントの発生と発達過程



図—9 代表的な4地点における凝固フロント位置と重力流れ表面の位置の時刻歴

すぐに凝固領域が生じ、時間の経過とともにほぼ等速で上昇していくことがわかる。凝固フロントが流れ表面に近づくとき凝固フロントの上昇速度は著しく減少している。注目すべきことは、流れ表面に接近するまでの凝固フロントの上昇速度はどの地点でもほぼ等しく、約 12 mm/s であることである。この速度の物理的な意味を調べることは今後の課題である。

以上に述べた高濃度重力流れの進行性凝固にともなう停止過程の観察結果は、筆者らの提案した解析モデル (Sassa ら, 2003) の予測結果と大概、調和的である。

5. ま と め

上向き浸透流によって液状化、流動化あるいは浮遊させておいた堆積物重力流れの流動ポテンシャルおよび流れの内部機構を一連の水槽実験を用いて観察した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 水中堆積物の流動ポテンシャルは、重力流れ発生前の地盤の状態 (固体状態/液状化状態/流動化状態/浮遊状態) に応じて顕著に変化する。すなわち、重力流れの流動ポテンシャルは、堆積物が有効応力を喪失することによって増加し、有効応力喪失後は、体積濃度の減少にともない増加していく。

(2) PIV を用いて、浮遊砂状態から発生した低濃度重力流れと流動化状態から発生した高濃度重力流れの内部の速度場を観察し、その内部機構の違いを明らかにした。低濃度重力流れの場合は、粒子群が流れ方向に速度を持つとともに鉛直下方向にも速度を持ち、粒子を徐々に堆積させながら流れていく。

(3) 高濃度重力流れの場合は、流れ表面より下の領域では土粒子は流れ方向のみに速度をもち、流れの低部から徐々に減速していき、流動化土が凝固する。その後、凝固領域は徐々に流れ表面に向かって拡大していき、流れの停止に至る。

(4) 凝固フロントの上昇速度はどの地点でもほぼ等しく、約 12 mm/s であることを示した。この速度を規定する物理パラメータの解明は今後の課題である。

参 考 文 献

- 木村一郎・植村知正・奥野武俊 (2001): 可視化情報計測, 近代科学社, 198 p.
- Eckart, W., J. M. N. T. Gray, and K. Hutter (2003): Particle Image Velocimetry (PIV) for granular avalanches on inclined planes, In: Dynamic Response of Granular and Porous Materials under Large and Catastrophic Deformations, Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics 11, pp. 195-218.
- Hampton, M. A., R. W. Lemke and H. W. Coulter (1993): Submarine landslides that had a significant impact on man and his activities; Seward and Valdes, Alaska. In: Submarine Landslides: Selected Studies in the U.S. Exclusive Economic Zone, pp. 123-134.
- Kneller, B. and C. Buckee (2000): The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications, Sedimentology, Vol. 47, pp. 62-94.
- Lowe, D. R. (1982): Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents, Journal of Sedimentary Petrology, Vol. 52, No. 1, pp. 279-297.
- Sassa, S., J. Miyamoto and H. Sekiguchi (2003): The dynamics of liquefied sediment flow undergoing progressive solidification, In: Submarine Mass Movements and their Consequences, Advances in Natural and Technological Hazards Research 19, pp. 95-102.