

表層崩壊の原因と仮説したソイルパイプ内の過剰間隙水圧発生を検証する模型実験

美馬健二，太田英将（有限会社太田ジオリサーチ）

Kenji MIMA, Hidemasa OHTA (Ohta Geo Research Co., Ltd.)

1. はじめに

平成 28 年の統計によると、土砂災害は、表層崩壊（がけ崩れ）が最も多く、全体の約 70% を占めている（がけ崩れ 1040 件、土石流等 399 件、地すべり 53 件）¹⁾。もし、表層崩壊の対策を的確に行うことができれば、土砂災害の件数は激減する。しかし、表層崩壊のメカニズムは、未だ解明されていないため、どこで表層崩壊が発生するのかを予測できず、的確な対策が進められていないのが現状である。また、未解明であるが故に、対策工においても、大規模な工事を要する抑止工（擁壁や法枠、アンカーなど）が行われており、財政上、このままではハード対策が劇的に進むことは期待できない。斜面防災を加速させるには、どこの斜面で崩れるのかを的確に予測することと、より経済的な対策工を実施することが効果的であり、表層崩壊のメカニズム解明は極めて重要である。

降雨による崩壊メカニズムの研究で明らかになっていることは、土砂災害は土壤雨量指数履歴順位第 1 位の雨で多発するということである²⁾。また、一説では、崩壊発生直後の斜面でソイルパイプからの水の流出が観察されることなどから、ソイルパイプが崩壊発生に関与している可能性があるといわれている³⁾。

一方、筆者らは、崩壊現象を再現するため、豪雨による表層崩壊を崩壊前後の地形及び土層厚分布、実測値の土質定数を用いて安定解析を行い、誘因となる崩壊時の地下水圧を推定してきた^{4) 5) 6)}。その結果、ほとんどの場合、地下水圧の水頭は、地表より上に出て、崩壊に至ることが分かった。ここでは、このような地下水圧を過剰間隙水圧と呼ぶ。

これらにより、崩壊の原因は、ソイルパイプ内の過剰間隙水圧であるという新たな仮説を立てた。そこで、実際にソイルパイプ内で過剰間隙水圧が発生し得るのかどうかを確認するため、地下水圧の測定できる土槽模型を構築し、実験により検証を行った。さらに、この実験結果により得られた知見を応用し、人工的なパイプ形成による過剰間隙水圧消散工法も別途模型実験で検証したため紹介する。

2. 過剰間隙水圧発生を検証する模型実験

2. 1 模型実験装置の概要

構築した模型実験装置の外観・寸法は、図-1 に示す。(1) 土槽の寸法は、内寸で幅 480

×長さ 795×高さ 200mm、傾斜角度は 20° である。(2)ソイルパイプを表現した径 2mm の孔を 1.5cm 間隔で空けたホース (内径 15mm) を用い、土槽の底に 2 本這わせる (図-2)。ホース内に水を流すと、孔から水が噴き出す仕組みである。(3)土槽中央の底に空けた孔からマンノメーターに接続し、土層内の水圧を目視できるものとした (図-3)。(4)土槽内に湿潤状態のマサ土を盛り、地表及び周縁は厚さ 1~3cm の粘性土 (マサ土にベントナイトを混合したもの) で被覆する。

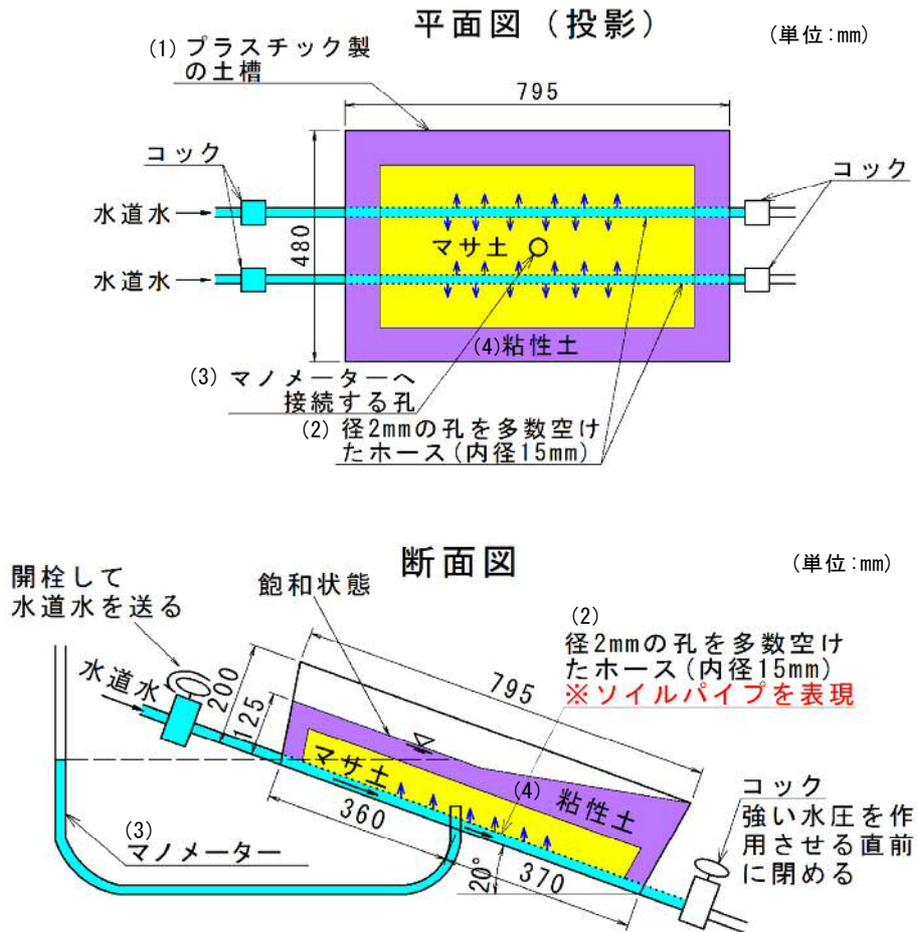


図-1 模型実験装置



図-2 ソイルパイプを表現したホースから水が噴き出す仕組み



図-3 土槽の裏側から接続したマンノメーター

2. 2 実験方法

- ①家庭用の蛇口から水道水を連続的にホースに送ることによって、土層内に水道の水圧を作用させる。
- ②マンノメーターの水位が上昇し、水位が地表より上に上昇するかどうかを読み取る。
- ③そのときに生じる土層の変形を観察し、記録する。

2. 3 実験結果

実験結果を図-4 に示し、以下に詳細を述べる。なお、実験状況は、図-5 に示す。

- (1) コックを開栓し、土層内に水圧を作用させると、
- (2) マンノメーターの水位は、地表より 4cm 程度上へ急上昇した。
- (3) これとほぼ同時に地表面に盤ぶくれが発生する。
- (4) 盤ぶくれ箇所から水が噴き出し始めると、
- (5) マンノメーターの水位はゆっくり降下し、地表高さで停止した。

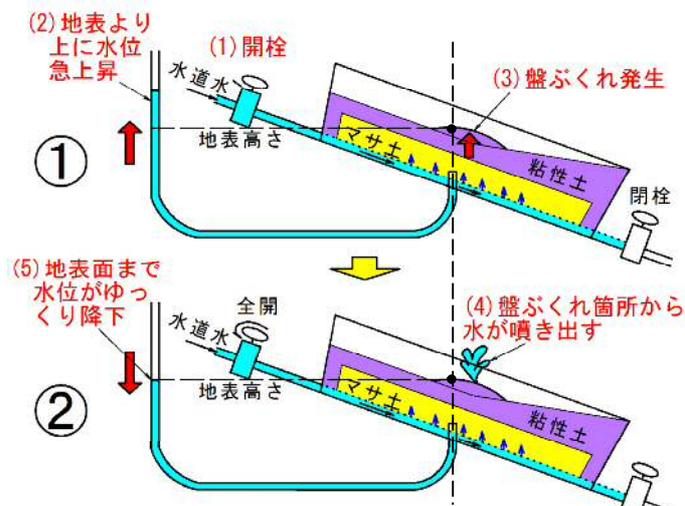


図-4 実験結果



図-5 模型実験状況 (写真の矢印の位置が地表高さであり、染料を混入したマンノメーターの水位は、その地表高さより最高 4cm 程度上まで上昇した。)

さらに、実験後、水が噴き出した箇所をスコップで掘り返したところ、図-6 に示す直径 1cm 程度のパイピングホールを確認した。このパイピングホールは、地下で高い水圧が作用させたことにより、水が地表へ抜け出そうして形成されたものと推測される。



図-6 水の噴出し箇所で確認されたパイピングホール

2. 4 実験の考察

過剰間隙水圧は、地表面を粘性土（難透水層）で被覆した被圧状態にある土層内に、急激に水を供給したことによって生じたと考えられる。しかし、地表面が難透水層で被覆されていても、水の噴出し口が形成されれば、水圧は地表高さまでしか上昇しないことが明らかとなった。ソイルパイプが崩壊発生に関与していることが指摘されているが、今回、斜面の安定にも寄与していることが分かった。つまり、ソイルパイプ内の水が地表に噴き出すことができるかどうか斜面安定の鍵になっていると考えられる。モデル化すると、図-7 のようになる。この実験結果を応用すれば、斜面点検時に水が噴き出した跡を探すことで水圧消散箇所を抽出することができ、相対的に危険な斜面を予測できる可能性がある。また、対策工法としては、地表から人工的にパイプ（水抜きパイプ、布団簞等）を形成することで、過剰間隙水圧の発生を抑制することができると考えられ、次の模型実験を行った。

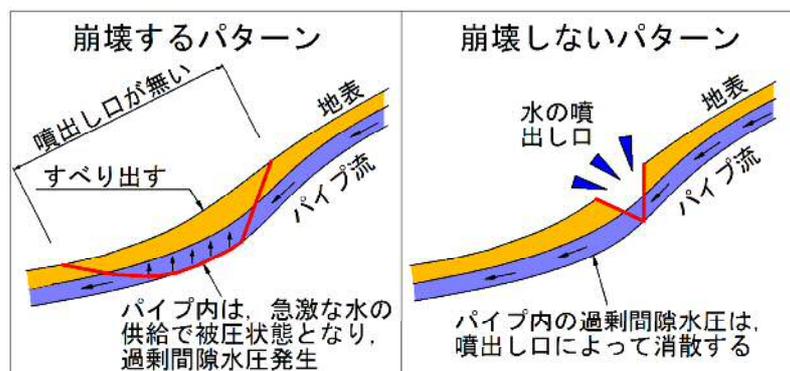
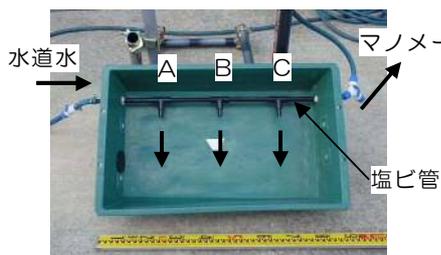
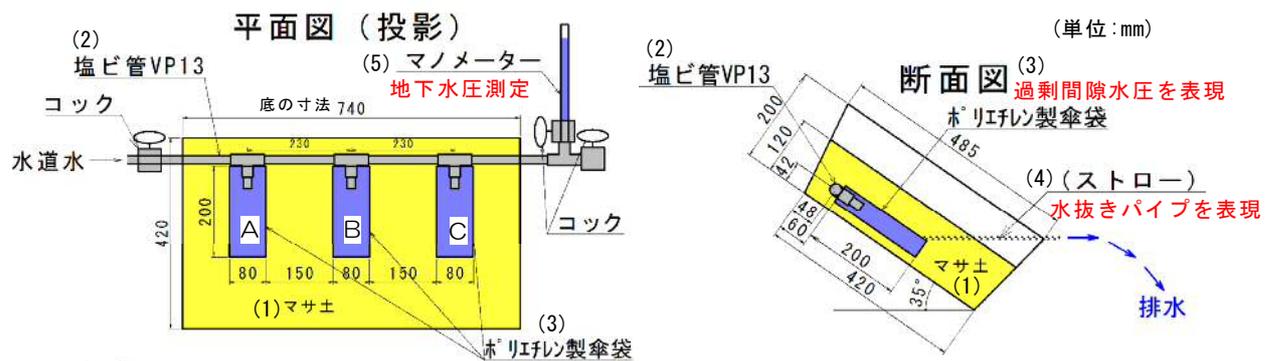


図-7 ソイルパイプ内に過剰間隙水圧が発生し崩壊するモデル

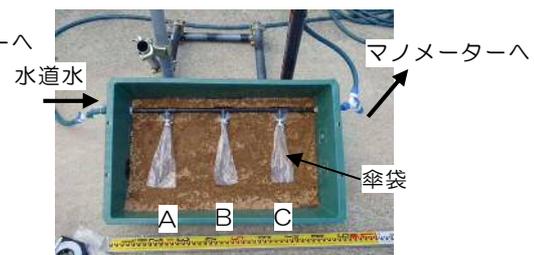
3 人工的なパイプの対策効果を検証する模型実験

3. 1 模型実験装置の概要

構築した模型実験装置の外観・寸法は、図-8 に示す。(1)土層の寸法は、幅 740×長さ 420×高さ 120mm、傾斜角度は 35° である。実験に用いた土は、湿潤状態のマサ土である。(2)土層内は、水を送るため、塩ビ管 (VP13) を水平に設置し、3 箇所に分岐 A、B、C (水の出口) を作った。(3)この水の出口をポリエチレン製の傘袋で密封する。これは、強制的に過剰間隙水圧を発生させるための工夫であり、水道水を送れば、この傘袋に徐々に水が溜まり、どこかのタイミングで水圧により破裂する仕組みである。なお、3 箇所分岐を作った理由は、どの斜面で崩れるのか分からない状況を作るためである。(4)この内、C の傘袋は、水抜きパイプを設置するため、小さな穴を開け、ストローを挿入し漏水しないよう接続した。つまり、A 及び B は、非排水であるのに対し、この C だけは排水を可能としている。(5)さらに、水道水を送る塩ビ管 VP13 の末端には、マンノメーターを設置し、土層内の水圧を目視できるものとした。最後に、傘袋に土を被せて、模型の完成である。



模型の塩ビ管 VP13 設置状況



傘袋設置状況



マンノメーター設置状況



模型の完成状況

図-8 模型実験装置 (最上部のイラストは模型の模式図)

3. 2 実験方法

- ①家庭用の蛇口から水道水を連続的に塩ビ管に送水し、土層内 A、B、C の傘袋に水を注水する。
- ②マンメーターの水位上昇を目視するとともに、A、B、C のどの斜面が崩壊するのかを観察する。

3. 3 実験結果

実験結果を図-9 に示し、詳細を以下に述べる。なお、実験状況は、図-10 に示す。

- (1) 塩ビ管に水道水を供給すると、C の水抜きパイプから排水が生じる。
- (2) 間もなく A、B、C に盤ぶくれが発生し、亀裂を伴いながら徐々に地表面の膨らみが大きくなる。これは、水の供給による傘袋の膨張に伴って生じている。この時点までは、マンメーターの水位に著しい変化は観測されない。
- (3) 地表面の膨らみの増加量が収束すると、ようやくマンメーターの水位が徐々に上昇し始める。
- (4) マンメーターの水位が、下端から高さ 1.32m まで上昇したところで、A の斜面で傘袋が破裂し、地表に一瞬水柱が立って水が噴き出した。
- (5) 水柱が立ったと同時に、マンメーターの水位は急降下する。
- (6) その直後、A は大量の水とともに崩壊し、約 10 秒間で主たる不安定土塊は流出した。
- (7) その後、さらに 10 秒程度継続して水を供給したが、B 及び C の斜面は崩壊しなかった。

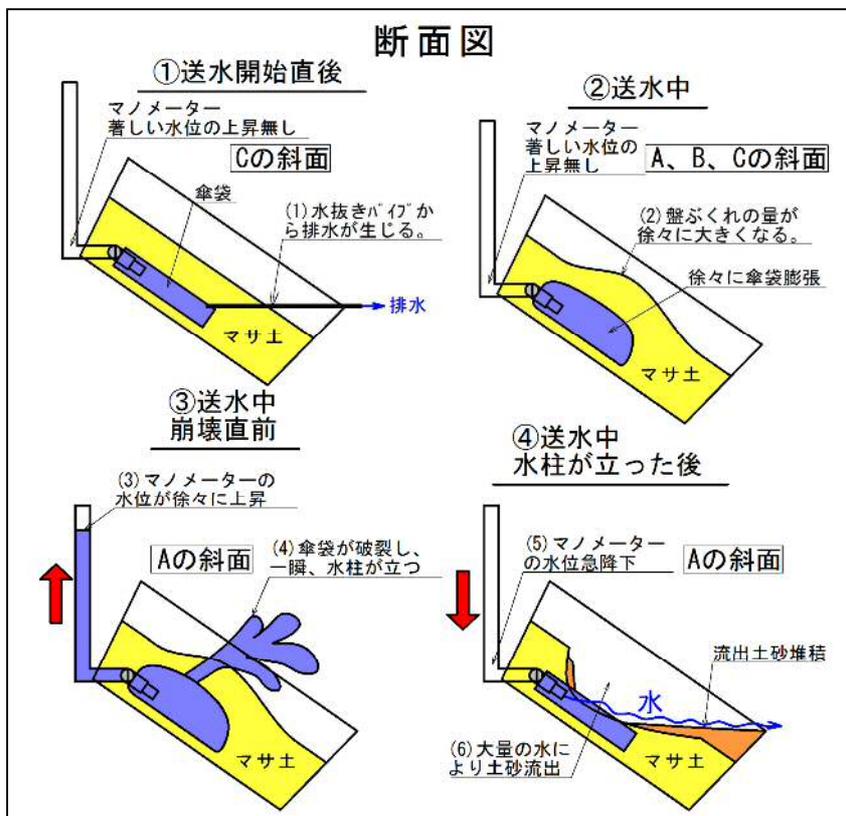
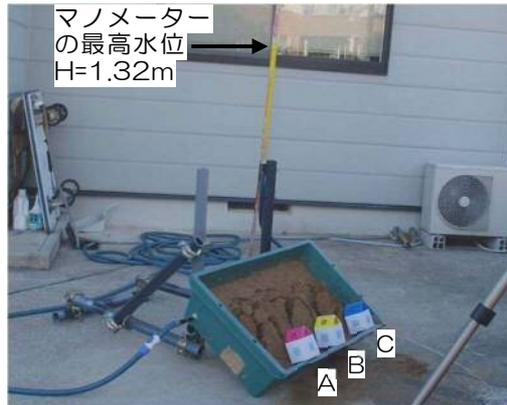
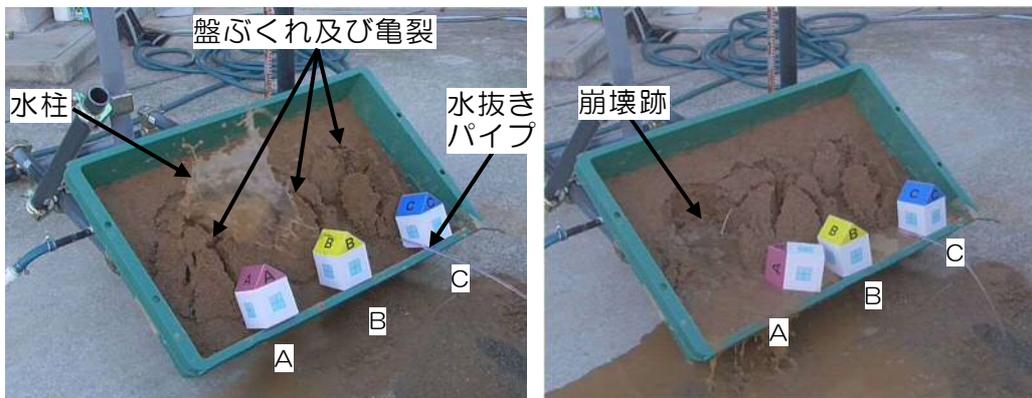


図-9 実験結果



崩壊直前におけるマンメーターの水位



崩壊直前に水柱が立った状況

崩壊後の状況

図-10 実験状況

4. まとめ

表層崩壊の原因と仮説したソイルパイプ内の過剰間隙水圧発生を模型実験で検証したところ、過剰間隙水圧は発生することが確認できた。その他の知見も併せて、以下に詳細をまとめた。

- (1) 模型実験により、地下水圧は地表より上に上昇する（過剰間隙水圧は発生する）ことが明らかとなった。
- (2) ソイルパイプ内の水が地表に噴き出すと、地表より上に水圧は上昇しない（過剰間隙水圧は発生しない）。
- (3) 上記（2）の結果を応用すれば、斜面点検時に水が噴き出した跡を探すことで、相対的に危険な斜面を抽出でき、表層崩壊発生箇所の予測に繋げられる可能性がある。
- (4) 水抜きパイプを設置して、模型実験を行ったところ、水抜きパイプを設置した斜面は崩れないという結果が得られた。上記（2）の結果より、予め地中に水の噴出し穴を人工的に形成しておけば、過剰間隙水圧は消散し、表層崩壊は予防できるものと考えられる。過剰間隙水圧消散工法としては、水抜きパイプなどが挙げられる。

<参考文献>

- 1) 国土交通省砂防部：平成 28 年の土砂災害，国土交通省ホームページ，
http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h28dosha/H28_dosyasaigai.pdf， 2017.
- 2) 社団法人地盤工学会：豪雨時における斜面崩壊のメカニズムおよび危険度予測，
pp. 132～133， 2006.
- 3) 堤大三：斜面土層内のパイプ流シミュレーションと表層崩壊，（社）日本地すべり
学会関西支部シンポジウム「表層崩壊予測の可能性」， pp. 21～48， 2012.
- 4) Hidemasa OHTA (2015) : Pore water pressure estimation method at the time
of the collapse using a Soil Strength Probe, 10th Asian Regional Conference
of IAEG
- 5) （公社）土木学会地盤工学委員会：脆弱な火山国日本での土砂災害の発生メカニズ
ムの究明と法制度も考慮した総合的防災・減災対策に関する研究報告書， pp. 59～
65， pp. 80～91， 2015.
- 6) 太田英将・美馬健二：ソイルパイプの過剰間隙水圧を考慮した安定計算法，第 56
回日本地すべり学会研究発表会講演集， pp. 109～110， 2017.