

降雨による大規模斜面崩壊の2次元土-水連成解析

岐阜大学	学生会員	○池村 猛
大同コンサルタント(株)		住 英樹
岐阜大学	正会員	八嶋 厚
岐阜大学	正会員	張 鋒

1. はじめに

岩盤斜面の崩壊には、掘削後数年を経た斜面が突然崩壊に至る事例や、豪雨時などに発生した崩壊が数時間をかけて斜面上方へ拡大していく事例が少なくない。このような岩盤斜面崩壊は、進行性破壊によるものと考えられており、その発生機構の解明が大きな課題となっている。本研究では、このような進行性破壊の原因となる地盤の応力-ひずみ関係の時間依存性を、岩盤内部の間隙水圧の経時変化に伴う有効応力状態の変化として捉えた。その上で、軟岩のひずみ軟化およびダイレイタンス特性を記述できる足立・岡¹⁾のひずみ軟化型弾塑性構成式を *Biot* の方程式に組み込んだ土-水連成有限要素解析により、岩盤斜面の進行性破壊のシミュレーションを行った。

2. 解析対象斜面の概要

解析には、1999年の台風17号に伴う集中豪雨により大規模崩壊が発生した JH 東海北陸自動車道美濃 IC-美並 IC 間の岩盤斜面を用いた。この岩盤斜面では、豪雨後に、斜面下部に構築された切土法面部分で幅 40m、長さ 50m の 1 次崩壊が発生した。その後、崩壊が段階的に拡大し、1 次崩壊発生から約 3 時間後に崩壊崖が斜面頂部に達した。崩壊の最終形は幅 120m、長さ 125m に及んだ。この斜面の地質は、強風化～風化を被ったチャートを主体とし、砂岩や泥岩を伴う。ボーリング調査と弾性波探査結果を基に想定された崩壊前の地質断面を図-1 に示す。

3. 解析方法

本研究では、崩壊の中軸部を通る断面において平面ひずみ状態を想定し、二次元有限要素解析を実施した。

- 解析モデル: 斜面形状と地質断面を考慮し、図-2 に示す解析モデルを構築した。接点数は 1520、要素数は 1422 であり、要素は風化岩盤、強風化岩盤、コンクリートブロック擁壁付き強風化岩盤の 3 種からなる。岩盤材料パラメータには表-1 の値を用いた。過去に同様の解析対象断面を用いて解析を行ったが、今回はさらに数種類の現位置試験と室内試験を行ない、その結果に基づいて単位体積重量および透水係数を設定した。境界条件は、モデルの両側面は水平方向のみ変位を拘束し、底面は水平、鉛直方向とも変位を拘束した。また、モデル両側面と底面を非排水境界とし、地表面を排水境界とした。

- 地下水条件: 初期地下水位は、ボーリングで確認された地下水位のモデル底面からの高さを全水頭として、そのコラムの全要素に与えた。この条件は、解析対象斜面内が初期から完全飽和状態にあることを想定している。しかし、通常の斜面では、地下水位以上の地盤は不飽和状態にある。したがって、解析における経過時間は、降雨開始からの時間ではなく、降雨が継続し岩盤斜面内が飽和状態となった時点からの経過時間を表すことになる。また、降雨時の岩盤斜面内の間隙水圧状態は、初期地下水位線がとおる要素に、地表から深度分までの正の圧力水頭を与えることによって変化させた。これは、後背山地から供給された地下水が、斜面内の地下水位を全体的に押し上げることを想定している。

4. 解析結果

進行性破壊の進展は、せん断ひずみの卓越領域の発達、および残留状態領域の一体化として捉えられる。そこで、本研究では、斜面全体の進行性破壊の進展状況をせん断ひずみの観点から検討し、残留状態への到達度に関しては、要素レベルで検討した。図-3 に塑性せん断ひずみの卓越領域の拡大状況を示す。この図から、斜面内に断片的に生じたせん断ひずみの卓越領域が時間経過とともに拡大し、円弧状のせん断帯に発達していく様子がわかる。図-1 と比較すると、せん断帯と崩壊面位置が良く一致している。図-4 は変位ベクトル図であり、斜面内部で塑性せん断ひずみの卓越する領域が拡大するにつれて、徐々に崩壊斜面要素が下方へ向いて行く様子を示している。4816step は微小変形にとどまっている最後の step であるが、3000step の場合よりも要素のベクトルがさらに下方を向いており、その大きさも増していることが分かる。また、図-5 では、せん断帯下部と上部に位置する要素群のせん断ひずみの経時変化を示した。まず要素 805 でせん断ひずみが大きくなり、その後、せん断ひずみの増加が両側の要素へ伝播していく様子がわかる。また、少し遅れて同様の現象が斜面上部の要素 1183 を中心に発生していることもわかる。図-6、図-7 に代表的な強風化岩盤要素の力学的挙動を示す。要素 682 は解析時間内 ($t=2408\text{sec}$) に破壊した要素であり、要素 697 は破壊しなかった要素である。破壊要素 682 ではせん断応力比-せん断ひずみ関係においてひずみ軟化を示しており、応力履歴経路が破壊基準線(以後 M_f 線と称す)と交差していることから破壊に至っていると判断することができる。ところが、非破壊要素 697 のせん断応力比-せん断ひずみ関係ではひずみ硬化の状態が継続している。応力履歴経路も、若干ではあるが一旦 M_f 線に向かった後、 M_f 線から離れていることから、破壊していないことが確認できる。一方、せん断ひずみ速さが急速に発達する時間は両者とも一致しており、崩壊斜面内の非破壊要素も破壊はしていないが、斜面崩壊と同時に滑っていることが確認できる。

5. おわりに

本解析により得られた知見を以下に列記する。①ひずみ軟化弾塑性構成式に基づいた土-水連成解析により、実岩盤斜面の進行性破壊現象を表現できることが確認された。②岩盤斜面の崩壊は、斜面内部に断片的に形成されたせん断ひずみの卓越領域が互いに連結し、せん断帯を形成することによって進行する。③岩盤のせん断帯は、岩盤材料のひずみ軟化現象によって形成される。④岩盤斜面内部に形成されたせん断帯が崩壊面となって斜面全体の崩壊に至る。⑤透水係数の大きさが、降雨から斜面崩壊までの時間に大きく影響する

参考文献 1) 足立紀尚・岡二三生: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文報告集, No.445, pp.9-16, 1992.

キーワード 斜面崩壊, 進行性破壊, 弾塑性構成式, 降雨

連絡先: 〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1 岐阜大学流域圏科学研究センター 張 鋒 Tel&Fax: 058-293-2465, E-mail: zhang-f@cive.gifu-u.ac.jp

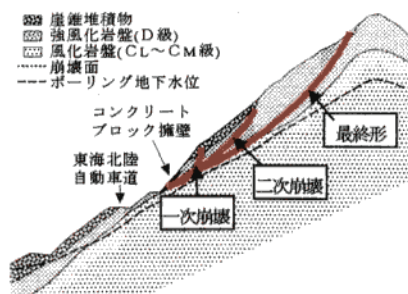


図-1 解析対象斜面の地質断面

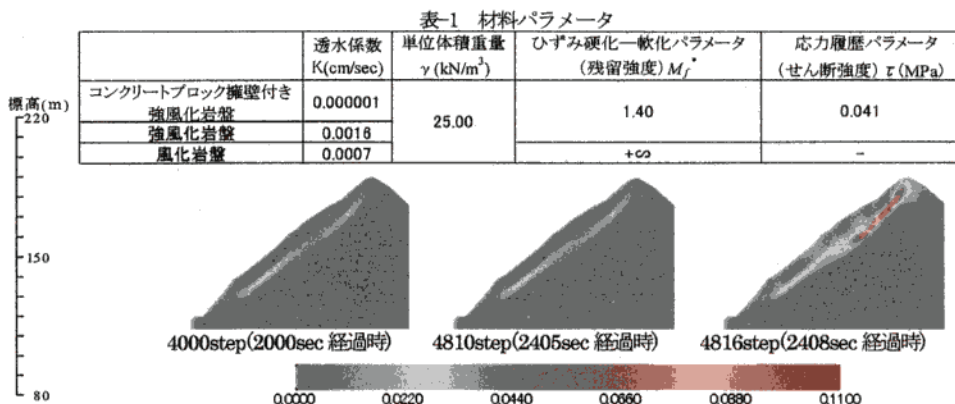


図-3 塑性せん断ひずみの卓越する領域の拡大状況

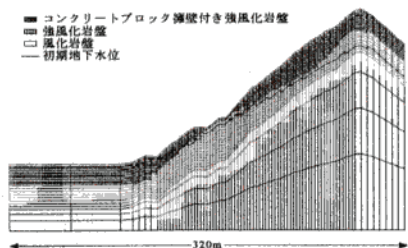


図-2 解析モデル

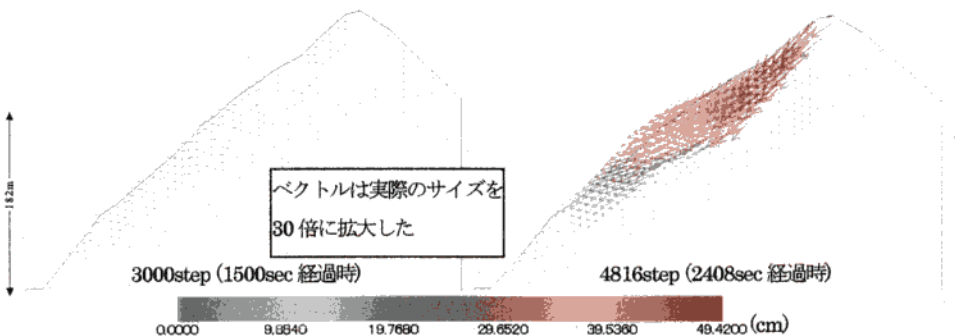


図-4 斜面の移動方向を示すベクトル図

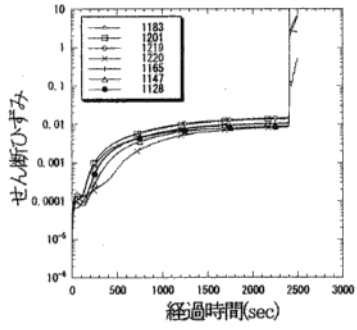
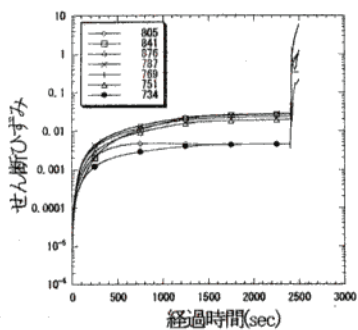
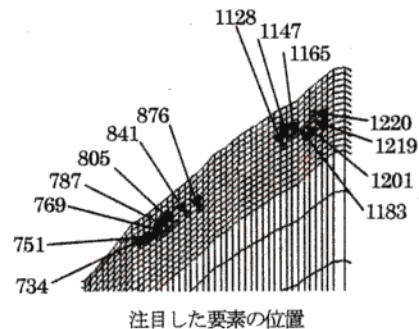
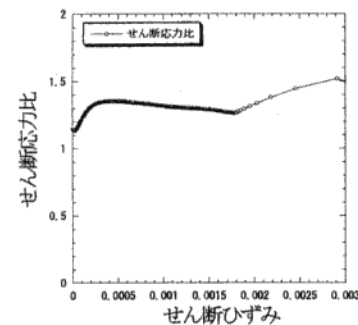


図-5 せん断ひずみの経時変化



注目した要素の位置



せん断応力, せん断応力履歴 ($\times 9.81\text{MPa}$)

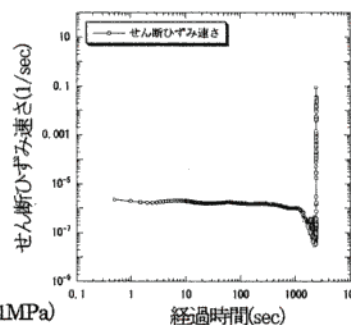
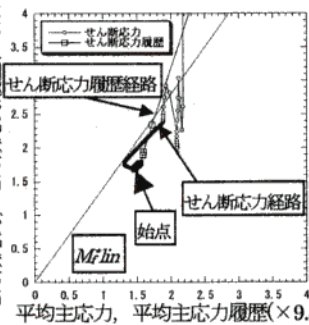
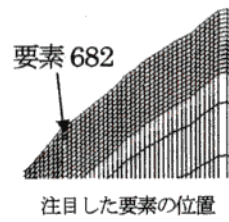


図-6 破壊要素 682 の力学的挙動



注目した要素の位置

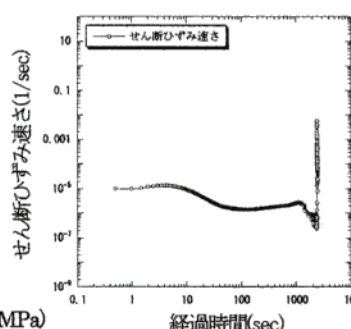
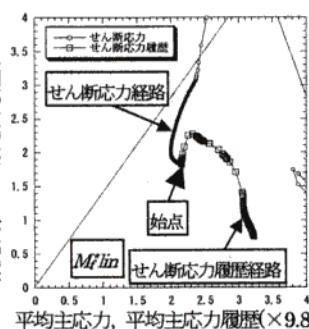
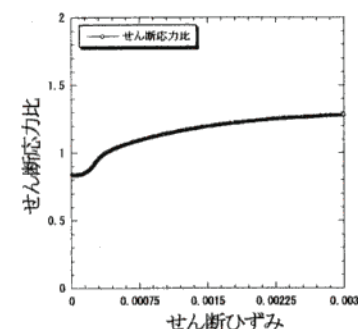
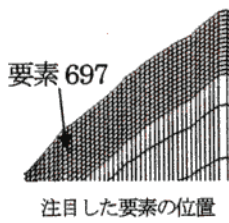


図-7 非破壊要素 697 の力学的挙動



注目した要素の位置