

| | |
|---------------|---|
| 氏 名 (本 國 籍) | 石 井 靖 雄 (秋田県) |
| 学 位 の 種 類 | 博士 (農学) |
| 学 位 記 番 号 | 農博乙第136号 |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平成24年3月13日 |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第3条第2項該当 |
| 学 位 論 文 題 目 | 有限要素法を用いた変位量計測に基づく地すべりの安定度評価に関する研究 |
| 審 査 委 員 会 | 主査 静岡大学 教授 土 屋 智 副査 静岡大学 教授 水 永 博 己 副査 岐阜大学 教授 千 家 正 照 副査 静岡大学 准教授 逢 坂 興 宏 |

論 文 の 内 容 の 要 旨

地すべりの安定度は、一般に極限平衡法を用いた安定解析により評価される。その際、土質パラメータを設定する必要があるが、その値として土質試験結果をそのまま用いることは適当でないことが多い。このため実務においては、ある状態での安全率を仮定し、土質強度パラメータを設定する逆算法が用いられてきた。しかしながら、仮定した安全率が地すべりの動きを適切に反映していない場合、この方法は往々にして対策工の規模が過大になる結果を生ずる傾向がある。実態に即した対策工を計画するには、安全率を仮定することなく土質強度パラメータを設定し、合理的に安定度を評価する手法の開発が必要とされてきた。一般に、地すべりの安定度が低下し滑動が生じると、土塊の変位量や変位速度が増加する。したがって、滑動を開始した地すべりでは、変位速度と土質強度パラメータ、安全率の間に何らかの関係が見いだされれば、現況の安全率を仮定しなくても、地すべりの移動状況に応じた安全率を算定できる可能性が考えられる。

近年では、様々な分野で有限要素法 (FEM) 解析が適用されており、地すべりを対象とする分野においても、その適用事例の報告は増加傾向にある。FEM 解析は極限平衡法とは異なり、地盤の変位量を評価できるため、活動を開始した状態にある地すべりでは、土質強度パラメータが与えられれば、地盤の変位量に応じた安全率が得られる可能性がある。

そこで、本研究は、地すべりの安定度の低下により生じる変位量や変位速度の増加に着目し、FEM 解析を用いて合理的に地すべりの安定度を評価する手法を検討する。具体的には、自然斜面を対象に、盛土による野外载荷実験において地すべり滑動を生じさせ変位量を計測し、すべり面位置を特定するとともに採取したすべり面の試料を用い土質試験を行った。解析では、計測データに基づいて FEM 解析による再現計算を行い、土質強度パラメータの探索が可能であることを明らかにし、この土質強度パ

ラメータを用いて、地すべりの安定度を定量的に評価する手法を検討した。以下に、本研究の内容と主要な成果について述べる。

1. 野外載荷実験と対象斜面の安全率

野外載荷実験では、自然斜面に盛土を行って地すべりを発生させ、地すべりの変位量を計測した。実験後には、立坑とトレンチを掘削してすべり面調査を行い、すべり面の深度を把握した。載荷時には、地盤伸縮計で計測した変位が急増した後に緩慢となり変位が見られない状態が生じたが、盛土を継続したところ変位が増加し続ける状態となった。そこで、この盛土高さまで載荷を行った段階を極限平衡状態（安全率が1.0の状態）と判断し、逆算法でその時の土質強度パラメータを推定した。安定度の評価に用いた解析法は、簡便法、簡易 Janbu 法、Morgenstern and Price 法と3次元解析法である Hovland 法と3次元簡易 Janbu 法であり、各載荷時から逆算法により得られた土質強度パラメータを与え、実験開始時からの盛土高さに応じた安全率を求めその違いを対比検討した。

この結果、安全率に与える影響は、各載荷時から得られる土質強度パラメータの違いのほうが、2次元と3次元を取り扱う安定解析法の違いよりも大きいことがわかった。また、土質パラメータを対比すると、3次元簡易 Janbu 法を用いた山上・植田法により得られる逆算値が土質試験結果に最も近い値を示した。

2. 有限要素法解析による地すべり滑動の再現計算

FEM 解析では、弾粘塑性モデルを用いたジョイント要素によりすべり面をモデル化し、2次元解析により野外載荷実験の再現計算を行った。この結果、弾粘塑性モデルを用いたジョイント要素ですべり面を構成した FEM 解析モデルが、地すべり滑動を開始し変位を加速する地すべりに対して、妥当な解析モデルであることが示された。また、FEM 解析により、地すべりの変位量を再現する過程において、すべり面の土質強度パラメータを設定できることが示された。ただし、今回の FEM 解析では、加速する地すべりの変位を再現するためには、土質強度パラメータを減少させる必要があった。

3. 有限要素法解析による安定度評価手法の提案

本研究では、2次元の弾粘塑性 FEM 解析モデルを用い、すべり面要素の滑動力と抵抗力の比から安全率を求める「拡張極限平衡法」と、地すべりのせん断強度を徐々に低下させ塑性化して得られるすべり面の形成から安全率を評価する「せん断強度低減有限要素法」(SSRFEM)とにより安全率を評価した。この結果、拡張極限平衡法により得られた安全率は、簡便法、Morgenstern and Price 法、弾塑性解析モデルを用いたせん断強度低減有限要素法 (SSRFEM) により得られた安全率とほぼ同じ値を示し、概ね妥当な解析結果を与えることが示された。

したがって、変位が生じ、すべり面が明らかとなっている地すべりでは、FEM 解析により地すべり変位量に対応する土質強度パラメータを設定し、拡張極限平衡法を用いて安全率を求めれば、ある状態での安全率を仮定することなく地すべりの安定度を評価できることが示された。

本研究で提案した手法は、すべり面に作用する応力の方向が考慮されていないことから、現地のすべり面の形状や勾配によっては適用できない可能性も考えられる。し

たがって、今後、異なるすべり面形状を有する地すべり事例の計測データを取得し、解析事例を積み重ね、現場への適用性について詳細に検討していく必要があると総括した。

審 査 結 果 の 要 旨

地すべりの安定度は、一般に極限平衡法を用いた安定解析により評価される。その際、土質パラメータを設定する必要があるが、その値として土質試験結果をそのまま用いることは適当でないことが多い。このため実務においては、ある状態での安全率を仮定し、土質強度パラメータを設定する逆算法が用いられてきた。しかしながら、仮定した安全率が地すべりの動きを適切に反映していない場合、この方法は往々にして対策工規模が過大になる傾向がある。実態に即した対策工を計画するには、安全率を仮定することなく土質強度パラメータを設定し、合理的に安定度を評価する手法の開発が必要とされてきた。

近年、地すべりを対象とする分野においては、有限要素法（FEM）解析が適用され、その成果の蓄積も少なくない。FEM 解析は極限平衡法とは異なり、地盤の変位量を評価できるため、活動状態にある地すべりでは、土質強度パラメータが与えられれば、地盤の変位量に応じた安全率が得られる可能性がある。

上記の背景に基づいて、本研究は、地すべりの安定度の低下により生じる変位量や変位速度の増加に着目し FEM 解析を用いて、ある状態での安全率を仮定することなく合理的に地すべりの安定度を評価する手法を検討したものである。

本研究は、実験部と解析部の二部からなる。実験部では、実際の自然斜面を対象に盛土を行い、原寸の地すべりを実験的に発生させるとともに、2次元的な地すべりの変位量と土質強度パラメータを把握した。解析部では、現地実験から得られたデータをもとに種々の安定解析式を用い、得られる安全率の比較検討を行ったうえで、FEM 解析による評価結果を総合的に考察し、ある状態での安全率を仮定することなく地すべりの安定度を評価できることを示した。

本研究は、地すべりの変位量と安全率とが密接に関係していることに注目した成果であり、地すべり対策工の具体的な規模を求める際に、大きく貢献することが期待される。

以上について、審査委員全員一致で本論文が岐阜大学大学院連合農学研究科の学位論文として十分価値あるものと認めた。

学位論文の基礎となる学術論文

1. 現地載荷実験における地すべりの安全率の変化、地すべり、2001年 38 (3) 244-247, 石井靖雄, 綱木亮介, 浅野広樹, 杉本宏之
2. 現地載荷実験の安定解析結果とすべり面粘土の土質試験結果の比較、日本地すべり学会誌, 2005年 41 (6) 595-606, 石井靖雄, 綱木亮介, 杉本宏之, 浅野広樹, 小山内信智
3. 孔内傾斜計設置用ガイドパイプの変形状況の現地確認と孔内傾斜計計測値の比較、日本地すべり学会誌, 2005年 42 (3) 228-235, 石井靖雄, 藤澤和範

4. Evaluation of slope stability by finite element method using observed displacement of landslide, Landslides, 2011, Yasuo Ishii, Keiichi Ota, Senro Kuraoka, Ryosuke Tsunaki, in press.

既発表学術論文

1. 山林火災により植生が変化した流域における土砂流出の実態, 砂防学会誌, 2000年 53 (1) 56-58, 石井靖雄, 小山内信智, 岩波英行
2. モデル斜面を用いた杭の FEM 感度解析結果とくさび杭の設計式の比較, 日本地すべり学会誌, 2005 年 42 (2) 175-181, 石井靖雄, 藤澤和範, 太田敬一
3. 地下水位の上昇による再滑動型地すべりの FEM 解析モデルと杭の FEM 再現解析, 日本地すべり学会誌, 2006 年 43 (2) 51-59, 石井靖雄, 藤澤和範, 中島祐一, 倉岡千郎
4. 貯水池周辺地すべりににおける残留率の要因分析, 日本地すべり学会誌, 2007 年 43 (5) 270-282, 江田充志, 鈴木将之, 藤澤和範, 壇上裕司, 石井靖雄
5. 最近の逆断層地震により発生した地すべりの分布と規模の特徴, 日本地すべり学会誌, 2011 年 48 (1) 23-38, ハスバートル, 石井靖雄, 丸山清輝, 寺田秀樹, 鈴木聡樹, 中村 明
6. 既往対策工による地下水位低下状況と地震による地すべり変動の関係, 日本地すべり学会誌, 2011 年 48 (5) 272-278, 中村 明, 野呂智之, 丸山清輝, 石井靖雄, ハスバートル, 池田伸俊