D16

地すべりハザードマッピングに対する有効応力解析法の適用性
Effective stress analysis to landslide hazard mapping

○柏木敬・飛田哲男・千木良雅弘・井合進
○Kei KASHIWAGI, Tetsuo TOBITA, Masahiro CHIGIRA, Susumu IAI

Earthquake-induced landslides of collapsible soils, such as volcanic cohesive soil, sometimes cause tremendous damage to human society. They are very fluid and its flow velocity is quite high. What is worse, since they typically occur on gentle slopes which is not designated as a steep slope area in danger of failure, it is incomprehensible even to residents nearby. Characteristics of such a landslide have been studied by many researchers. However, failure mechanism, especially under dynamic condition, is as yet unknown. Based on the field investigation and laboratory test results, the slope of Hanoki-daira in Fukushima Pref., where this type of landslide occurred in the 2011 Tohoku Earthquake, is modeled as one-dimensional FEM model to elucidate the failure mechanism and improve quality of landslide hazard mapping by combining the numerical analysis (dynamic) with conventional method (static).

1. はじめに

火山灰質粘性土をすべり面とする崩壊性地すべりが世界各地で発生している．この地すべりは地震によって引き起こされ，非常に流動的であるといった特徴を持つ. また, 緩斜面で発生するため, 危険区域の指定を受けていない．この地すべりのメカニズムを二次元有効応力解析法 FLIP[1)]により明らかにするとともに，地すべりハザードマッピングの精度向上を図る．

2. 解析モデル

解析モデルを図-1 に示す．解析モデルは東北地方太平洋沖地震の際，火山灰質粘性土をすべり面とする崩壊性地滑りが生じた福島県白河市の斜面を対象にしており，無限長斜面を仮定し 1 次元のモデル化を行っている．解析モデルは，すべり面となる弱層（以下，弱層と呼ぶ）とその上下層部の 3 層から成り，それぞれの解析パラメータは河原 [2)]を参照した．解析の順序としては，自重解析を行い初期せん断応力を与え，その後，水平方向に地震動を与えることにより動的解析を行う．

3. 従来の安全率と数値解析による安全率

解析の結果をハザードマップに適用するために, 斜面の危険度を定量的に判断したい．そこで，安全率を用いて斜面の安全性を評価することを考える．そこで従来用いられている無限長斜面の安全率を導出する方法と解析による方法を比較する．まず静的な場合の安全率を考える，無限長斜面仮定下での安定計算では一般的に(1)式によって安全率 Fs が算出される．

$$Fs = \frac{c + W\cos\theta\tan\phi}{W\sin\theta} \cdots\cdots (1)$$

ここで，c: 粘着力(kN/m^2)，W: 土塊の質量(kN)，θ: 傾斜角(°)，ϕ:内部摩擦角(°)である．一方，数値解析による安全率 Fs'は，(2)式に自重解析から得られる応力を代入することにより算出する．

$$Fs' = \frac{c\cdot\cos\phi + \{(\sigma_x + \sigma_y)/2\}\sin\phi}{\sqrt{\tau_{xy}^2 + \{(\sigma_x - \sigma_y)/2\}^2}} \cdots\cdots (2)$$

ここで，σ_x: x 方向の直応力(kN/m^2)，σ_y: y 方向の直応力(kN/m^2)，τ_{xy}: せん断応力(kN/m^2)である．両者を図-2 で比較すると，無限長斜面を仮定した場合の安全率（式(1)）は，数値解析（式(2)）のそれに比べ, 傾斜角が約 15 度以上ではほぼ等しい値となるが，それ以下の傾斜角では過大評価する傾向があることがわかる．

続いて，地震動が作用する場合を考える．地震時の斜面の安定計算には地震動の水平方向の最大加速度と重力加速度の比である水平震度 K_h を用いて安全率を導出する震度法という方法がある．この震度法を適用した無限長斜面の安全率を(3)式に示す．

$$Fs'' = \frac{c + (W\cos\theta - K_h W\sin\theta)\tan\phi}{W\sin\theta + K_h W\cos\theta} \qquad (3)$$

ここで入力地震動の振幅を 50gal に固定し，その周期を 0.5s，5s，50s と変化させた 3 つのケースについて，傾斜角 5 度の場合の解析を行う．その結果から得られる弱層の応力の残留値を式(2)に代入し，式(3)の安全率と比較する（図-3）．震度法では地震動の最大加速度のみを考慮しているため，周期が変化しても地震の最大加速度が同じであれば安全率は一定である．一方，数値解析では入力地震動の周期の影響を考慮でき，それにより安全率が 1.2 から 2.5 の範囲で変動することが分かる．以上より，数値解析により斜面の傾斜角と入力加速度の卓越周期を考慮した安全率を算出することができ，これを用いることでハザードマップの精度向上を図ることができる．この考え方は，構造物の耐震設計における「震度法」と「修正震度法」の関係とみなすこともできる．

4. 地震応答解析

2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された地震動（K-Net, FKS016）を，先の傾斜角 5 度の解析モデルに入力し得られた弱層部の有効応力経路を図-4 に示す．ここで縦軸の偏差応力は式(2)の分母で与えられる．これより偏差応力は τ_{xy} の純せん断応力成分と $(\sigma_x - \sigma_y)/2$ という軸差応力成分で構成されていることがわかる．そこで弱層における純せん断応力成分と軸差応力成分の時刻歴応答（図-5）についてみると，純せん断応力成分については地震動の作用とともに値が変動するが，残留値は自重解析による初期せん断応力と一致する(約 11 kPa)．これに対し軸差応力成分は地震動の作用とともに低下し，残留値はほぼ 0 kPa に収束する．以上より，偏差応力（式(2)の分母）は地震動の作用とともに低下し，最終的に純せん断成分と等しくなることがわかる．さらに，この純せん断成分は初期値と残留値が等しくなることから，偏差応力の値は最終的に，自重解析から得られる初期せん断応力と同じ値を示すことがわかる．したがって，偏差応力の最終値が自重解析の時点でわかるため，地震動により平均有効拘束圧がどの程度低下するか動的解析を介さずに推測することができれば，動的解析を行わずとも地震時の斜面の安定性を予測できる可能性がある．

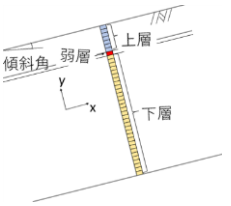

図-1　解析モデル

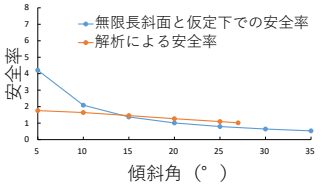

図-2 安定計算と解析の比較

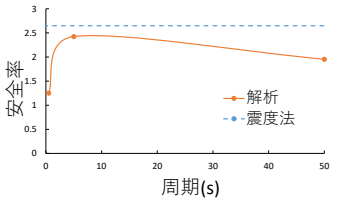

図-3　入力地震動の卓越周期とすべり安全率の関係

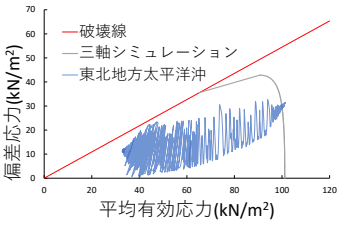

図-4　弱層における有効応力経路

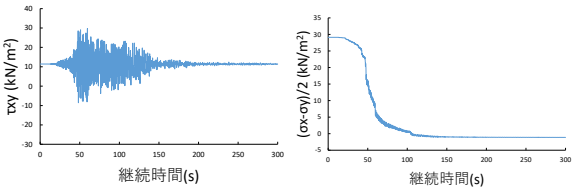

図-5　弱層における純せん断成分と軸差応力成分の時刻歴

5. まとめ

(1) 無限長斜面仮定下での安定計算は解析に比べ，小さな傾斜角にて安全率を過大評価する傾向がある．(2) 数値解析では震度法では考慮できなかった地震動の周期の影響を考慮し斜面の安全度を評価することができる．(3) 地震応答解析の結果から，地震時の有効応力経路における偏差応力の残留値が自重解析の結果から推測でき，平均有効拘束圧の低下量を推定できれば，自重解析のみで地震時の斜面の安定性が評価できる可能性がある．

参考文献：1) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T. (1992). Strain space plasticity model for cyclic mobility: Soils and foundations, Vol.32, No.2: 1-15.，2) 河原尚徳 (2016). 初期せん断応力作用下での粘性土の非排水繰返しせん断挙動に関する研究，京都大学工学部卒業