土木学会第51回年次学術講演会（平成８年９月）

I-A 472　確率離散化極限解析による盛土斜面の信頼性解析

ＪＲ東日本　正会員　柳河　勇
武蔵工業大学　正会員　星谷　勝

１．はじめに

自然地盤は多くの不確定要因を含んでいる．そのため，空間的に広がる地盤全体を確定的に把握することは困難である．そこで確率場の理論を適用することにより，不確定性を定量的に評価しようという試みが多くなされてきた[1)2)]．

本研究では，Kawai[3)]によって提案された剛体ばねモデルによる離散化極限解析に確率論手法を組み込んだ，確率離散化極限解析の定式化を行う．また盛土斜面をモデルとした数値シミュレーションによる事例解析を行っている．

２．離散化極限解析

剛体ばねモデルは要素自身を剛体とし，要素境界面上の垂直方向およびせん断方向に設けたばねで結合した，離散モデルを用いて解析する方法である．特に崩壊や破壊パターンを求めるという極限解析を目的としている．離散モデルであることから，材料の非均質性や自己相関性などを容易に取り扱えられ，また不連続面の位置と方向が未知である解析に適している．破壊条件は，土の場合に一般的に用いられているクーロンの条件とし，条件を満たすと要素境界面上のばねが降伏するとしている．

３．確率離散化極限解析の定式化

従来の安定解析では，土体の内部における最も大きなせん断応力の働くすべり面の位置を設定し，そのすべり面に作用するせん断応力と，そのすべり面に沿ったせん断抵抗を求め，安定解析を行う．一般的に用いられている分割法で表すと，判定に必要となる性能関数Zは式(1) で与えられる．

$$Z=\sum(c-\sigma\tan\phi)l-\sum\tau l \tag{1}$$

しかし地盤物性値が不確定性を有しているにもかかわらず，確定的な地盤と仮定したりあるいは平均値で代表したりしない限り，すべり面を推定することは困難である．ましてや，多数のすべり面に沿った破壊の可能性のある，一般的な多層地盤においては一層困難となる．

一方剛体ばねモデルは，任意に離散化された要素境界面の組合せによって，多数のすべり面が想定できる．ところがすべり面の性能関数として式(1) を与えると，離散モデルの各要素境界面毎にクーロンの破壊条件を考えているから，式(1) で$Z\leq 0$となってもすべり面に沿った全要素境界面が降伏している斜面崩壊状態とは限らない．従って本研究における斜面崩壊の定義は，天端から斜面内・斜面先・側方地盤地表面まで，降伏した要素境界面で結ばれた状態とした．

先ず，一つのすべり面を考える．任意のすべり面iがn個の要素境界面で構成されているとする．E_{ij}を要素境界面jの破壊事象として上記の定義に従うと，すべり面iの破壊確率P_{fi}はn個のE_{ij}が同時に生起する確率となるので，並列系のシステムとして式(2) で表現できる．ただし地盤物性値は位置的な自己相関性を持つことから，E_{ij}も相互に相関を持つといえる．

$$P_{fi}=\Pr(E_i)=\Pr(E_{i1}\cap E_{i2}\cap\cdots\cap E_{in}) \tag{2}$$

さて，m個のすべり面を考慮した盛土斜面のシステムとしての破壊確率P_fは，少なくともどれか一つのすべり面が崩壊すればシステムの破壊となる，直列系のシステムとして式(3) で表現できる．ただし同様に各すべり面は相互に相関を持つといえる．以上よりE_{ij}の直列・並列組合せシステムといえる．

$$P_f=\Pr(E_1\cup E_2\cup\cdots\cup E_m) \tag{3}$$

同様に盛土斜面のシステムとしての性能関数 Z も，個々の要素境界面の性能関数 Z_{ij} 間に相関が存在するため，確率変数に関して複雑な非線形式となる．そこで本研究では剛体ばねモデルによる離散化極限解析をグラフ理論でモデル化する．モデル化に際しては，

- 剛体ばねモデルの節点を，グラフの節点に対応させる．
- 降伏した要素境界面を，辺に対応させる．
- システムの破壊を，グラフにおけるパスの実現とする．

グラフ理論に基づいて離散化極限解析の破壊の判定を行うこととするが，これは確率変数に対して陰な形式の表現となっていることから，モンテカルロシミュレーション法を適用する．

４．数値解析例

提案した手法の検討と既往の研究との比較を行う目的で，図-1 に示す文献 2) と同じ地盤を対象とし，ただし $1tf \cong 10kN$ として，数値計算を行う．要素分割は文献 2) より地盤部の第 1 層と第 2 層のそれぞれの底部破壊に関する二つの最小安全率すべり面を参考にした．

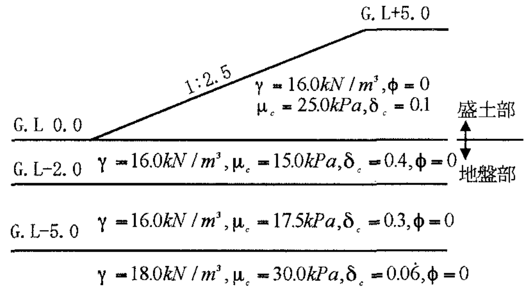

図-1　粘性土 4 層モデル

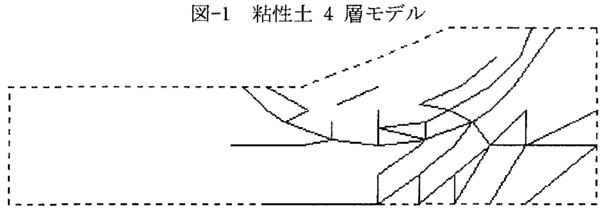

図-2　崩壊を起こしたサンプルの例

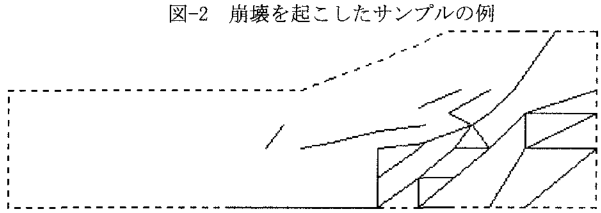

図-3　安定したサンプルの例

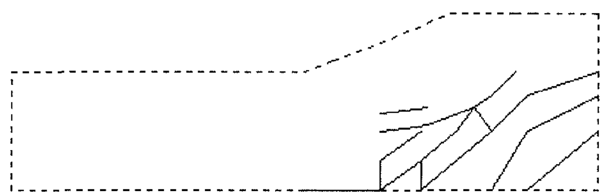

図-4　局所破壊確率 $P_{fij} \geq 0.9$ となった要素境界面

図-2 は崩壊を起こしたサンプルの例である．点線がモデルの境界，実線が降伏した要素境界面である．要素分割の際の参考としたすべり面のうち，第 2 層に関する底部破壊のすべり面を通っている．図-3 は安定したサンプルの例である．すべり面が途切れており崩壊へは至ってない．図-4 は破壊確率が 0.9 以上の値となった要素境界面を実線で示したものである．

モンテカルロシミュレーション法を 1000 回行ったときの破壊確率 P_f は 0.097 が得られた．文献 2) ではすべり面が完全相関の時は 0.067，完全独立の時は 0.121 である．相関を考慮できる本手法が両者の間に収まっており，本手法は妥当なものであると判断した．

５．まとめ

本研究では，剛体ばねモデルによる離散化極限解析にモンテカルロシミュレーション法を組み込んだ，確率離散化極限解析の定式化を行い，数値シミュレーションによってその有用性を示した．このことは材料が非均質性や自己相関性を有し，各破壊モードが相関関係を持っているシステムの信頼性解析を，より的確かつ比較的容易に求め得ることを示している．

（参考文献）

1) 松尾稔：地盤工学　信頼性設計の理念と実際，技報堂出版，1984.
2) 星谷勝・石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
3) Kawai, T. : New element models in discrete structural analysis, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, No.141, pp.187-193, 1977.