

東京大学大学院 ○加藤誠章、執印康裕

1.はじめに

樹木根系の斜面安定効果は、根系があることによるせん断抵抗の増分で評価されることが多い。このことは、せん断抵抗を実験的に直接求めることが簡単であること、極限平衡法による斜面安定解析に用いるパラメータとして適用可能であることなどによる。しかしながら、根系を含んだ土体の強度は、土の応力-ひずみ特性、根系の応力-ひずみ特性、根系と土の間に生じる抵抗力の相互作用による結果生じるものであり、より正確な根系評価モデルを構築するためには土の変形状態について同時に評価することが不可欠である。ただし、樹木根系の形状が複雑であることなどから、現時点では斜面内部の変形状態を評価することが可能な根系評価モデルを構築することは非常に困難である。

本研究では、仮想的な斜面として直根の模擬根を用いた一面せん断試験を想定し、実験結果に基づき弾塑性有限要素法を用いた根系評価モデルを作成した。一面せん断試験を対象としたのは、すべり面が特定されること、内部の変形状態の把握が比較的容易であること、形状が単純であること、既存の研究結果が多いことなどの理由による。モデルの作成にあたり、根系密度とせん断応力の関係と同時に内部の変形状態を再現することを目的とした。

2.モデルの概要

2.1.モデルの対象とした実験について

本研究では、図1に示す一面せん断試験機による実験結果をモデルの対象とした。実験では、模擬根を鉛直に設置せん断試験を行うと同時に内部の変形状態の測定も行われている。

2.2.用いた仮定

本研究では、以下の仮定を用いた。せん断変形は回転対称であるとし、せん断箱上部のみについて評価を行う。土は弾塑性体で近似し、応力-ひずみ関係は単純せん断試験結果より推定した。模擬根は剛体とし、せん断の進行に伴い回転する。すべり面はせん断箱の境界のみで生じているとし、発生の有無は境界部の節点に応力に対する基準を設けた。基準は土のみの一面せん断試験の収束値より得た。土と根の間に生じる力は模擬根を土の中で水平方向に変位させるときの抵抗力のみとし、計算上の最適値を与えた。

2.3.節点及び要素の配置

本研究におけるモデルでは、せん断箱上部について節点を配置し、土については三角形一次要素を設定した。なるべく簡便にするため、模擬根及びすべり面についてはすべり面上または模擬根付近にある節点に対する境界条件として与えた。

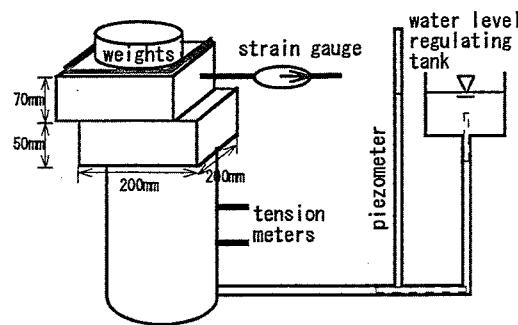
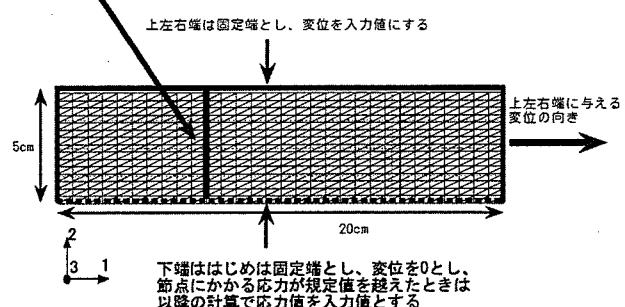


図1.せん断試験機模式図

(模擬根はせん断箱内に鉛直に設置されている、せん断後に試料を削って内部の変位も測定される)

模擬根については、最初は模擬根と同じ場所にある節点に模擬根と同じ変位を与え、節点に掛かる力が規定値以上だった場合は、以降の計算で規定値を入力とする



せん断変形が回転対称であるとし、せん断箱の上箱のみについて計算を行った

図2.計算で与えた節点と要素

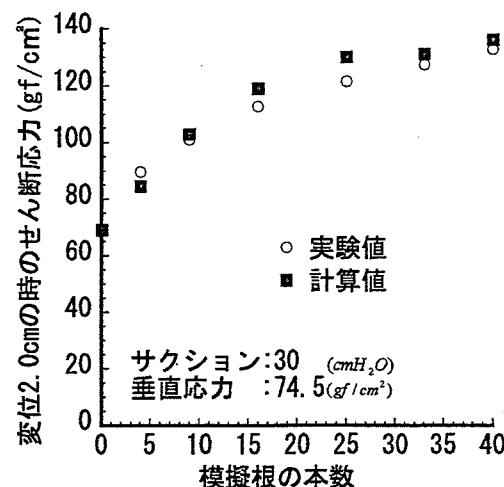


図3.せん断応力の比較

2.4 境界条件について

節点に与えた境界条件は以下の通りである(図 2 参照)。上左右端については固定端とし、せん断箱に与えたせん断変位と等しい変位を与えた。下端については、すべり面の発生の有無を表現するため、せん断初期には変位を 0 として計算を行い、その結果、節点上の応力の水平成分がしきい値を越えた場合には次の計算からはしきい値を応力として与えた。また、鉛直成分については変位が 0 になるようにした。根系についても同様に、せん断初期には模擬根上にある節点の変位と模擬根自身の変位が等しいとし、節点上の応力の水平成分がしきい値を越えたときに次の計算ステップからは敷居値を応力として与えた。この場合も鉛直成分については変位が 0 になるようにした。

2.4 二次元弾塑性有限要素解析

モデルをなるべく単純にするため、本研究では以下の構成式を用いた。

$$\text{弾塑性構成式(速度系)} : d\sigma_{ij} = D_{ijkl}^{ep} d\varepsilon_{kl}$$

$$\text{ただし、 } D_{ijkl}^{ep} = 2G \left[\delta_{ik}\delta_{jl} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij}\delta_{kl} - \alpha \frac{9G\sigma'_{ij}\sigma'_{kl}}{2\sigma^2(H'+3G)} \right]$$

ここで、 σ_{ij} ;応力、 D_{ijkl}^{ep} ;弾塑性係数行列、 ε_{ij} ;ひずみ、 G ;剛性率、

ν ;ポアソン比、 α ;定数(弹性なら 0、塑性なら 1)、 σ' ;偏差応力、 $\bar{\sigma}$;相

当応力、 H' ;瞬間的加工硬化率である。

指導原理として仮想仕事の原理を用いた。

$$\int_V (\sigma_{ij} \delta \varepsilon_{ji}) dV = \int_V (X_i \delta u_i) dV + \int_{S_F} (X_{ni} \delta u_i) dS$$

静的陽解法(rmin 法)を用いて計算を行った。

3. 計算結果

図 3 に根系本数とせん断強度の関係を実験結果と計算結果をあわせて示す。図より、根の水平方向への抵抗力に最適値を与えることによって、実験結果がほぼ再現されることがわかった。

本モデルにおいて、内部の土の変形状態は図 4 の通りに示される。図 4 で、下半分は上半分を 180 度回転させたものである。図より、根系が無いときはせん断面で試料が上下に分断され、ひずみはせん断面付近においてのみ大きいこと、根系が多いときは内部が連続で、ひずみがせん断箱の端に集中している結果となった。このことについては、図 5 に示すとおり、実験においても同様の傾向が見られた。

4まとめ

新たに根系評価数値計算モデルを構築し、多様な根系密度において実験結果の一部が再現された。ただし、現時点ではせん断変位に対するせん断応力の応答などについて再現できていない部分があり、パラメータ等のさらなる検討による精度の向上が必要である。また、今回のモデルでは剛体に近似可能な模擬根のみが評価の対象であった。今後は、根系が疑似弾性体として近似可能な場合についても検討が可能になるように拡張する予定である。

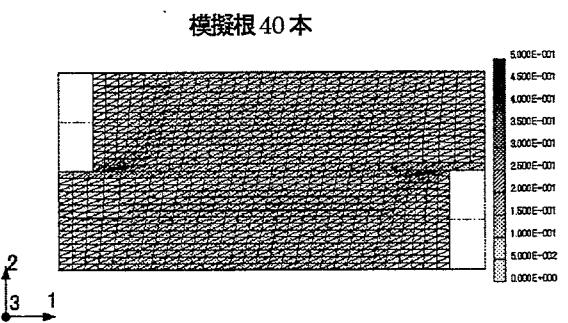
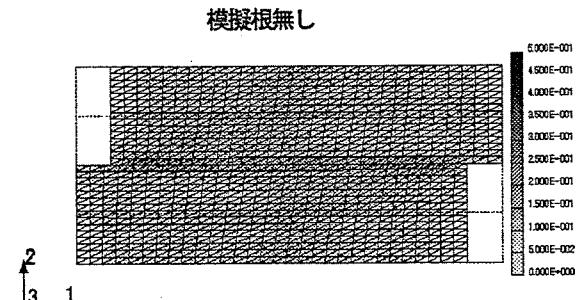
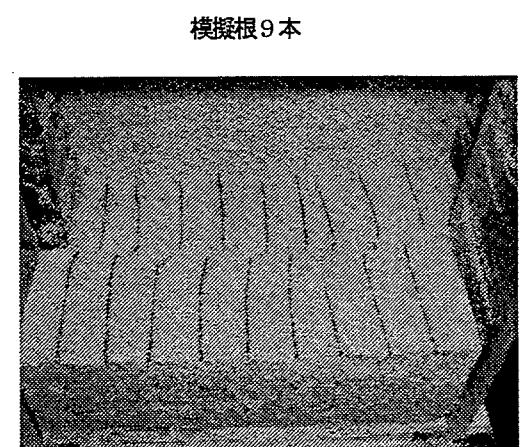


図 4. 試料土の変位と相当塑性ひずみの分布(計算結果)
(30cmH₂O、垂直応力 74.5g/cm²、せん断変位 1.8cm のとき)



模擬根 40 本

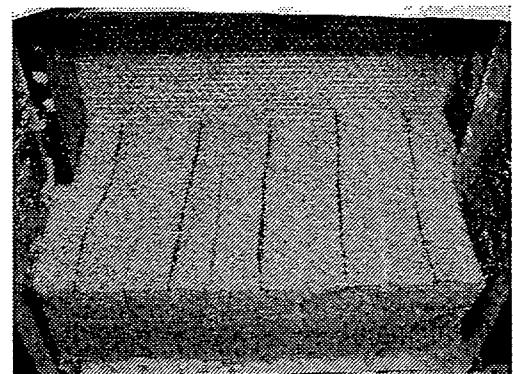


図 5. 試料土の変形(実験結果)
(30cmH₂O、垂直応力 74.5g/cm²、せん断変位 1.8cm のとき)