

不飽和土の力学特性とサクションとの関係に関する理論的考察

建設省 正会員 ○ 日下部 隆昭
京都大学工学部 正会員 建山 和由

1. はじめに 不飽和土の力学特性の発生機構を把握するために、土粒子接点における懸架水の表面張力に起因するサクションに着目し、不飽和土の力学特性について考察を行った。具体的には、土を等大球の集合体でモデル化し、不飽和土の力学特性を数値計算によりシミュレートする手法を作成した。さらにガラスビーズを用いた側方拘束状態の圧縮試験によりその妥当性を検討した。

2. 等大球2粒子モデル

不飽和土では間隙は水で満たされておらず、間隙水は間隙空気との境界面の表面張力により、土粒子接点でつづみ状のメニスカスを形成する。この時、表面張力は水の表面積が小さくなる方向に働くので、 $u_s - u_w$ なる負圧（サクション）が働く。この時不飽和土を図-1の様な等大球の集合体と考えるとサクションに起因する1節点当たりの粒子間張力は次式で表される¹⁾。

$$H = \pi \cdot b^2 \cdot T \cdot \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{b} \right)$$

図-2は、含水比 w 、間隙比 e 、土粒子半径 R から、内部拘束応力 σ_s （不飽和土中の単位面積に働くサクションに起因する粒子間力）を求めるためのフローチャートである²⁾。次にこのフローチャートを利用して、側方拘束状態の土を圧縮する場合の圧縮特性を数値計算により考察する。この時 σ_s は土粒子を互いに引きつけあう方向に働くので土粒子の移動を妨げる働きをする。このため土に外力として圧縮力が加わっても、土に働く有効応力はこの分減少すると考えられる。これを式で表すと次のようになる。

$$\Delta \sigma' = \Delta \sigma - \Delta \sigma_s$$

この考え方にに基づき不飽和土を側方拘束状態で一次元圧縮したときの e - $\log p$ 曲線を計算により求めると図-3のようになった。

3. 間隙水の偏在に関する考察

図-3に示すように等大球2粒子モデルを用いて計算した e - $\log p$ 関係は、低含水比の場合ほど右上方に現れており、 $w=0\%$ の近傍が最も右上方に位置する。しかし、実際の低含水比の不飽和土ではサクションの影響は小さいと考えられる。これは、計算では水が各粒子間接点に均等に配分されるとしているが、実際の不飽和土では間隙水は各接点に均等ではなく偏った形で保水されるからと考えられる。そこで、一定の保水角以下ではメニスカスが生じ得ないものと仮定を加え（単位体積の土中に含ま

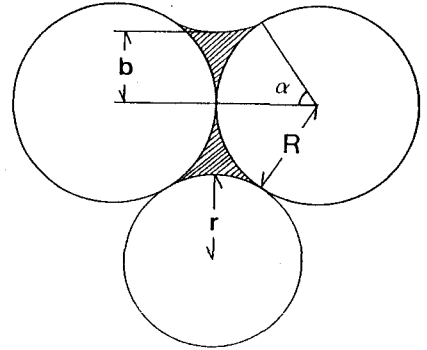


図-1 等大球2粒子モデル

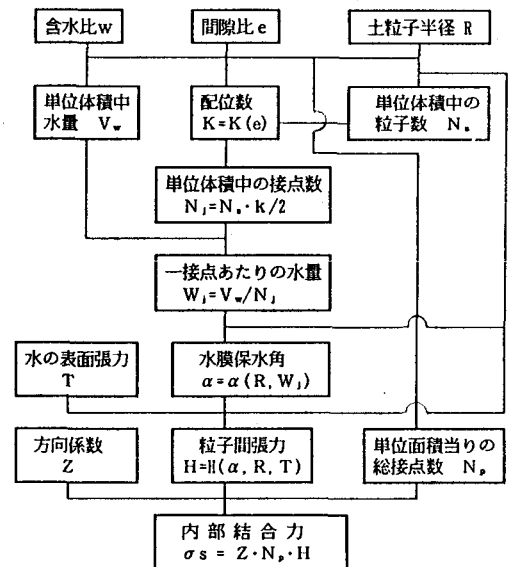


図-2 不飽和土の内部結合応力の算定法に関するフローチャート

Takaaki KUSAKABE, Kazuyoshi TATEYAMA

れるメニスカスの存在する粒子間節点の数は減少する), 前述のフローチャートに従いメニスカスが存在する限界の3種の保水角 α_{min} について内部拘束応力 σ_s を計算すると図-4のようになる。この仮定を導入すると低含水比域で内部拘束応力 σ_s は含水比とともに減少することになる。

4. 実験とその結果

ガラスビーズ($R=5.0 \times 10^{-5}m$, $G_s=2.53$)を用いて不飽和土の側方拘束状態の一次元圧縮試験を行った。実験では含水比 w を6段階に変化させ、通常の圧密試験装置を用いた。この実験結果を $e-\log p$ 面上に描き、6種の含水比 w それぞれに対して $e=0.71$ の時の圧縮応力を求め、この値と飽和試料の圧縮応力との差をその含水比における内部拘束応力 σ_s とした。このようにして求めた内部拘束応力 σ_s と含水比 w との関係を図に表すと図-5のようになる。図中のプロット点は実測値であり、実線はこれに対する計算値である。ここでは保水角の最小値 α_{min} を 34° とし、また、粒子径 $R=5.0 \times 10^{-5}m$ で計算を行っている。

5. 内部拘束応力 σ_s の実験値についての考察

図-5の数値計算では、実物よりも小さい粒子半径 R を採用した。これは、実際の粒子半径 $R=5.0 \times 10^{-5}m$ を用いると内部拘束応力 σ_s の計算値が実測値より小さくなるからである。その原因として、細粒子混入による接点数増加の影響を考えてみた。すなわち等大球の集合体にそれよりも粒径の小さな球が入り込むと粒子の接点数は非常に大きくなる。この時、増加した各接点に懸架水を均等に配分すると、接点数が増加する上に1接点あたりの粒子間張力も増加するため内部拘束応力 σ_s が増加すると考えられる。不飽和土の力学特性としては、この他に等体積一面せん断試験と直立面のすべり破壊試験を行った。その結果、試料に加わる力が大きい程、実験結果から求めた内部拘束応力 σ_s が大きくなることがわかった。本来、サクションによる内部拘束応力 σ_s は垂直応力 σ による直接の影響を受けない。従って実験より求めた内部拘束応力 σ_s には、サクションによる内部拘束応力 σ_s 以外の拘束応力が含まれていたと考えられる。このことは、実験と計算の差異を説明する上での手がかりになるのではないかと考えている。

6. まとめ

以上、不飽和土の側方拘束一次元圧縮特性に及ぼすサクションの影響について実験と計算により検討を行った。この結果、計算では、粒子径にかなり小さい値を使用しないとその挙動を表現できないことがわかった。

(参考文献) (1) 山口柏樹著: 土質力学, pp. 31-40, 1984年 (2) 畠昭治郎他: 水浸時挙動を考慮した土の締固め施工規準の決定方法について, 土木学会論文集第382号, pp. 227-235, 1987年

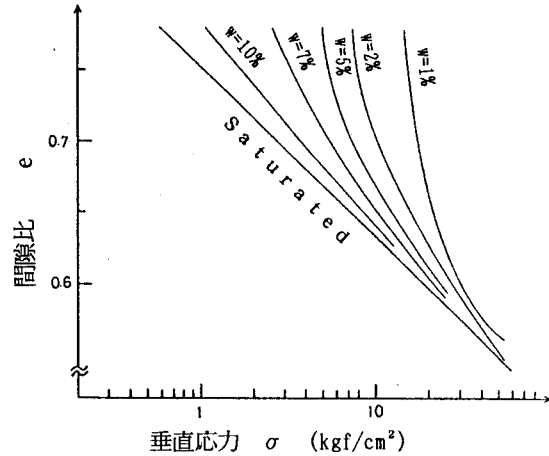


図-3 不飽和土の $e-\log P$ 曲線

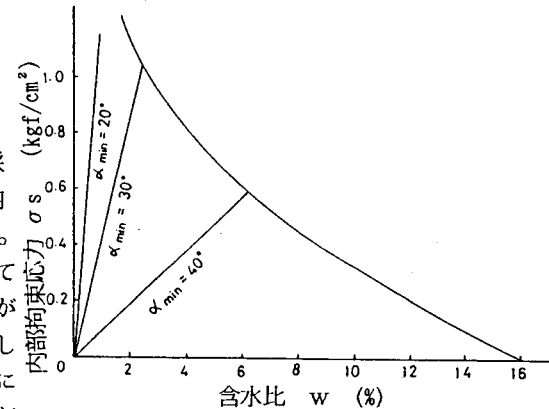


図-4 内部拘束応力 σ_s の計算値

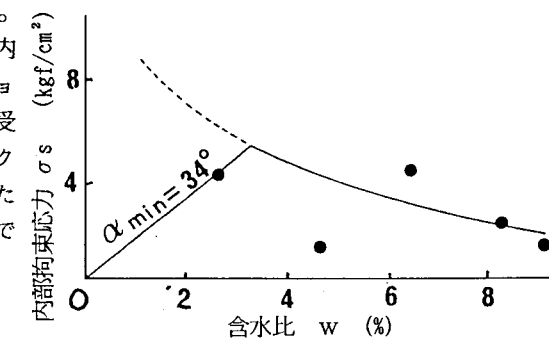


図-5 圧縮試験のシミュレーション結果