

III-256 土の締固め曲線に関する理論的考察

京都大学工学部 正員 建山 和由
京都大学工学部 正員 畠 昭治郎

1. はじめに 土の締固めにおける水の働きを考察するため、土を等大球の集合体でモデル化し、土粒子接点に懸架される水の表面張力に起因する粒子間力が土の締固め特性に及ぼす影響を数値計算により求め、この結果を利用し、土の締固め曲線が理論的に描き得ることを示す。

2. 不飽和土の力学特性と土中水について 不飽和土が飽和土と大きく異なる点は、土中の保水状態にある。飽和土では土粒子間の空隙は水で満たされているが、不飽和土では水は土粒子接点でつづみ状に保持されている。このため、土粒子間には水の表面張力に起因する粒子間力が働き、これが不飽和土の力学特性に大きな影響を及ぼす。図-1は土粒子を等大球で置換し、粒子接点における保水状態を示したものである。このとき土粒子は水の表面張力により、次式で表わされる粒子間結合合力 $H(N)$ で互いに引きつけられる¹⁾。

$$H = \pi b^2 T \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{r} \right) \quad \begin{matrix} \alpha : \text{水膜角} \\ R : \text{土粒子半径(m)} \\ b, r : \alpha \text{と} R \text{の関数}^{1)} \end{matrix}$$

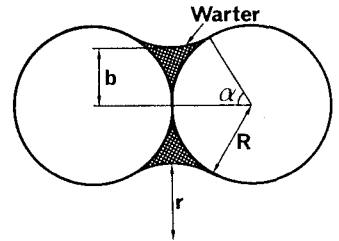


図-1 土粒子間の保水状態のモデル化

この結合合力は、粒子間拘束力となり、粒子の互いの移動を妨げ、不飽和土の力学特性に影響を与える。土中には数多くの土粒子接点が存在し、これらの接点に作用する粒子間結合合力 H が集って不飽和土中には結合応力が生じる（以下、内部結合応力 σ_s と呼ぶ）。この内部結合応力 σ_s は、土を等大球の集合でモデル化した場合、その空隙比 e 、含水比 w 、土粒子半径 R から算定することができる。図-2はこの過程をフローチャートで示したものである²⁾。ただしここでは、
1) 土は、均質な等大球の集りでモデル化される。
2) 土中水はすべての土粒子接点に均等に配分される。
3) 土中の水は接点においてのみ保持され、土粒子表面の吸着水は考えない。等の仮定を行っている。

図中の*印を付けた項目について若干の説明を行うと、

*1: 配意数 K とは、1個の土粒子が接している他の土粒子の数であり、等大球のモデルでは空隙比により決まる（ $K = 5.363 - 6.045 \cdot \ln e$ ）²⁾。

*2: 水膜角 α と土粒子半径 R 、1接点あたりの水量 W_j との関係は、図-1に示される水膜部の幾何学的関係から求めることができる²⁾。

*3: 方向係数 Z は、土粒子の接点方向がランダムであることに対する補正係数であり、ある特定の方向の粒子間力を求めるのに用いられる。球が全くランダムな充填状態にあるならば、 $Z = 2/\pi$ である。

*4: R_m は、等大球モデルを任意平面で切ったときそこに現われる粒子切断面の平均半径であり、 $R_m = \pi \cdot R / 4$ である。

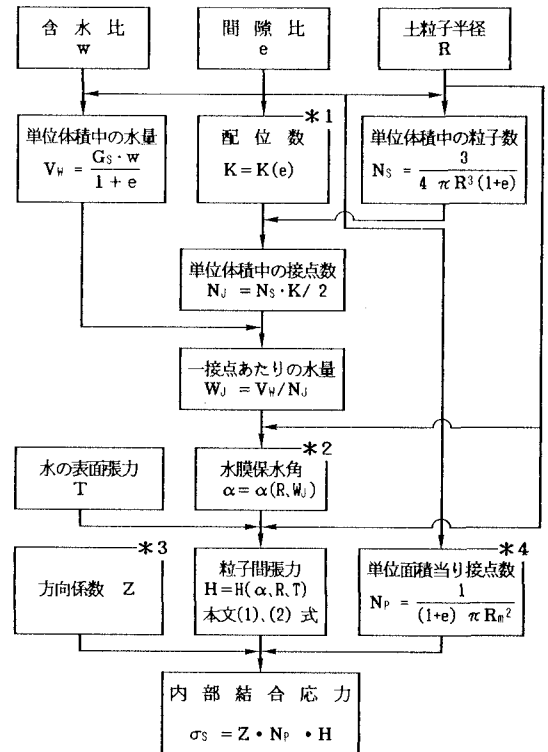


図-2 内部結合応力算定のフローチャート

3. 締固め曲線 次に、この計算過程を利用して土の締固め曲線を描いてみる。締固め方法としては、側方拘束状態での静的圧縮を想定する。基本的な方針としては、飽和土を一次元圧縮した際に得られる間隙比と載荷圧との関係（ $e \sim \log p$ 関係）に不飽和土中に生じる内部結合応力の効果を足し合わせて、不飽和土の密度（間隙比から計算）と載荷圧との関係を求め、この結果から締固め曲線を導く。

いま、含水比 w の不飽和土が、ある上載圧のもとで一次元圧縮されて、間隙比 e という状態になった場合を考える。このときの上載圧は飽和状態の土を間隙比 e まで圧縮するのに必要な圧力 p と不飽和土であるがために生じる内部結合応力 σ_s の和に等しいと考えられる。内部結合応力 σ_s は、図-2のフローチャートから、土の間隙比、含水比と土粒子半径から計算することができるので、含水比をパラメータとして、上載圧 $p_s (= p + \sigma_s)$ と乾燥密度との関係を描くことができる。図-3は、この結果を示したものである。計算では、飽和土の間隙比～圧力関係（ $e \sim \log p$ 関係）として深草土のデータ（ $C_c=0.17$ ）を用い、また、乾燥密度 ρ_d は、 $\rho_d = G_s / (1 + e)$ を用いて間隙比から求めた（ $G_s=2.70$ 、 $R=4 \times 10^{-9} \text{ m}$ ）。

締固め曲線はこの図から描くことができる。すなわち、ある載荷圧を想定し、図-3において、その載荷圧が加えられたときに得られる乾燥密度を読み取り、これを含水比に対しプロットするわけである。

図-4はこの結果であり、載荷圧 $p = 2, 4, 8 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ の3通りについて、締固め曲線を描いたものである。ただし、図を描くときには、締固め曲線が零空気間隙曲線に達すると、土中の間隙は水で飽和されるため、それ以上、空気の実出による締固めを行うことができず、密度はこの曲線に沿って減少すると仮定している。

4. 結果に対する考察 図-4で示される締固め曲線は零空気間隙曲線までは含水比とともに乾燥密度が増加すること、ならびに、載荷圧が大きいほど左上に位置するという締固め曲線の一般の傾向をよく表わしている。しかし、実際と異なる点として、含水比の小さい領域で、実際の締固め曲線では密度の増加が顕著でないのに対し、計算結果では低含水比ほど密度の増加が大きく現われている。これは、実際の土、特に含水比の低い土では、土中水は各接点に均等に配分されず、部分的に偏った形で保水されるが、計算では、各接点に均等に配分されると仮定したため、実際よりも含水比の増加に対する内部結合応力の減少が大きく算定されたことに起因すると考えられる。

また、計算では、土粒子半径 R として、一般の値よりかなり小さい値を用いている。これは、実際の土では、種々の大きさの土粒子が混じり合っているため、大きな土粒子の間隙に小さな土粒子が入り込み、単位体積あたりの土粒子間接点の数が増えるのに対し、計算では土粒子を等大球と仮定しているため、このような現象を表現できず、接点数が少なくなり、内部結合応力が小さく算定されるという欠点を土粒子半径を小さくすることで補っているためである。低含水比領域での間隙水の不均一な配分、土粒子の大きさ、形の不均一性を考慮できれば、より現実に近い締固め曲線が描けるものと考えられる。

参考文献 1) 山口柏樹著：土質力学、技法堂、p.37、1986年
2) 島他2名：締固めた不飽和土の水浸時挙動の予測に関する研究、不飽和土の工学的性質研究の現状シンポジウム発表論文集（土質工学会）、pp.131-140、1987年

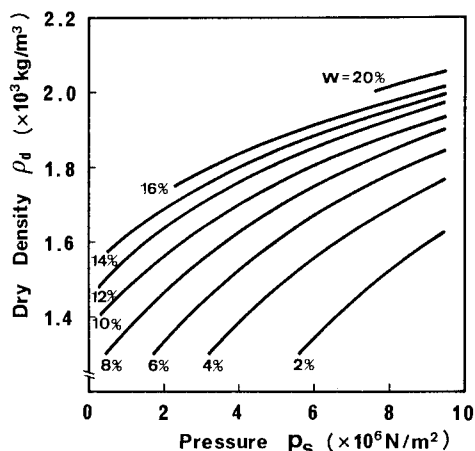


図-3 不飽和土の締固め特性（計算結果）

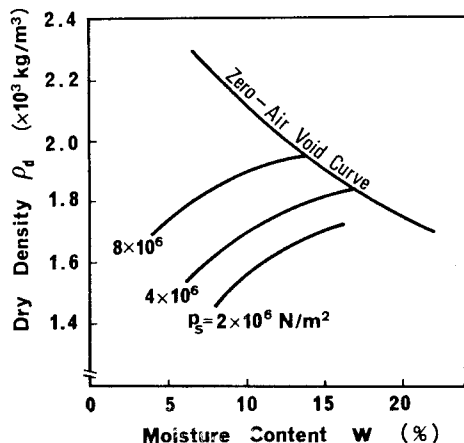


図-4 計算により求めた締固め曲線