



粒子形状による粒状体の内部摩擦角の推定法と理学・工学の融合

独立行政法人国立高等専門学校機構
岐阜工業高等専門学校 教授
環境都市工学科/建設工学専攻 吉村優治

1. はじめに

日本の平野は堆積作用の結果形成されたもので、主な沖積平野は海洋に臨む臨海沖積平野であり、わが国の大都市のほとんどがこの沖積平野を中心に発展してきた。筆者の勤務する岐阜工業高等専門学校も木曾三川によって造られた濃尾平野に立地し、この濃尾平野でも下水汲み上げによる地盤沈下とともに地震時の液状化が大きな問題の一つになっている。一方で、木曾三川流域の砂は良質な細骨材として利用されたり、木曾川下流の祖父江砂丘は白く美しいことで有名であり、地元住民の憩いの場となっている。水とともに暮らしがあり、川とともに文化がある。そんな木曾三川流域の河川敷に堆積している河川砂に接しているうちに、筆者は「ひと握りの砂があったら、簡単な物理的な試験を行うだけで、土質工学上重要な力学的な性質が推定できないだろうか」といった夢を持つに至った。そして、粒子形状というキーワードにより、その夢に一步近づいた。

また、地盤や地質を対象とする調査・研究は、理学と工学の両分野で取り扱われてきているが、理学の分野では主として地盤構造、堆積過程、地質年代の推定などの解明に精力がそそがれているのに対して、工学の分野では主として対象とする地盤の構造、物理的・力学的性質などを精度良く把握し、設計や解析に反映させることに重点が置かれているように、各々の視点に立って独自の路線を歩んできた。したがって、理学の分野では貝化石・微化石などの分析や¹⁴Cによる年代測定などにより、地盤構造、堆積環境などはかなり詳細に、しかも具体的に解明されているにもかかわらず、工学の分野では設計や解析に必要な地盤の状態や材料定数は柱状図や土質試験結果に基づき、たとえば土層別の平均値を代表値としたり、深度方向に回帰式を作成するなどして推定しているのが現状である。そこで濃尾平野沖積層の主として砂質土を対象として、工学的基礎研究と原位置での堆積学的研究を融合させ、まず現地での堆積環境を把握し、平面位置と深度から物理的性質を推定したうえで、さらにその性質からせん断強度の推定を試みることを考えた。

本論文は、上記の筆者の夢や試みを現段階の研究成果で紹介したものである。

2. 粒子形状による粒状体の内部摩擦角の推定

砂のような粒状体の力学的特性は、土粒子の材質、粒度組成、粒子形状などの一次性質、あるいは密度、含水量、骨組構造などの二次性質によって決定されると言われている¹⁾。筆者らはこれまでに、せん断中の粒子破砕が無視できる場合には、粒状体の内部摩擦角は粒子寸法や粒度分布にほとんど影響を受けず²⁾、粒子形状の影響が大きいこと³⁾、さらに相対密度 D_r が同程度であれば粒子形状のみから内部摩擦角の推定が可能であること⁴⁾を報告してきた。

2.1 粒子形状の定量化

粒状体の形状がせん断強さなどの工学的な性質に大きな影響を与えることは、すでに Terzaghi and

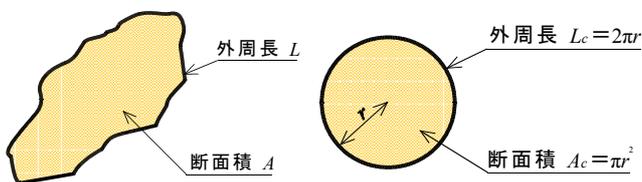


図-1 土粒子の投影断面 図-2 球の投影断面

Peck の著書⁵⁾の中で報告されている。しかし、砂粒子では個々の粒径が小さく、定量化の作業が煩雑であるために、現在も粒子形状の定量的評価はほとんどなされておらず、地盤工学会基準(JGF)でも粒状体の形状を定量化する指標は定義されていない。筆者らは、形状の定量化が比較的簡単であり、しかも個人誤差が入りにくく、その形状係数が取扱い易い数値であること、自然にある砂の形状の違いを適切に表現できることなどを考慮して、凹凸係数 FU を提案⁶⁾した。

粒子内の直交する三軸を考え、図-1に示すようにその長軸と中間軸を含むように粒子を投影した断面(粒子を平面に安定するように置いたときの投影断面)について考える。ここで粒子周辺の凹凸の度合いが増すにしたがって、投影断面の外周長 L が長くなり断面積 A との比が大きくなることに着目し、これらの比である無次元量 f を次式で表す。

$$f = A/L^2 \dots\dots\dots (1)$$

また、投影断面が円の場合に図-2に示すように、その半径を r とすれば外周長 $L_c = 2\pi r$ 、断面積 $A_c = \pi r^2$ となり、式(1)は円の場合に次式のように最大値をとる。

$$f_c = \frac{A}{L_c^2} = \frac{\pi r^2}{(2\pi r)^2} = \frac{1}{4\pi} = 0.0796 \dots\dots\dots (2)$$

この f と f_c の比が凹凸係数 FU であり、次式で定義される。

$$FU = f/f_c = 4\pi A/L^2 \dots\dots\dots (3)$$

この凹凸係数 FU は、粒子が完全球(投影断面が円)の場合に 1.0 で、凹凸の度合いが激しくなるほど小さくなる係数である。したがって、この FU を用いると砂のような粒状体の粒子形状を 0 ~ 1.0 の数値で表すことができる。

2.2 凹凸係数 FU による内部摩擦角 ϕ_a の推定

筆者らのこれまでの系統的な研究成果⁷⁾から明らかになった内部摩擦角 ϕ_a と凹凸係数 FU の関係を、密詰め(相対密度 $D_r=75\%$)、中密($D_r=50\%$)、ゆる詰め($D_r=25\%$)状態毎にプロットして求めた近似線を示したのが図-3である。たとえば、図中の白抜きプロットは、4種類の人工粒状材料の中密状態での $\phi_a - FU$ 関係である。

この図は、上述2.1の方法により粒状体試料の FU を決定すれば、せん断試験を行わずして図中の相対密度 D_r 別の直線により ϕ_a が推定できることを意味している。

図-3中には3個の楕円のゾーンを描いている。これは、これらの粒子の形状を一例として3種類に大別したものである。この3個の楕円で囲まれたゾーンのどれに相当するかは、代表的な粒子投影写真を参考にすれば肉眼や倍率が10倍程度の虫眼鏡で識別ができるであろう。すなわち、肉眼や虫眼鏡で粒子形状がこの3種類の楕円ゾーンのどれに相当するかを識別すれば、せん断試験を実施しなくても内部摩擦角 ϕ_a の値が大略予測できる。なお、この図によればわが国の碎屑性堆積砂の場合には、かなり丸いものであっても ϕ_a が 30° 以下になることはまれであると考えられる。

また、これまで原粒度ではせん断試験ができず、粗粒材を含まないように相似粒度やせん頭粒度に調整した試料を用いて大型三軸試験により決定していた粗粒材料の内部摩擦角も、この図-3を利用することにより容易に推定できる。

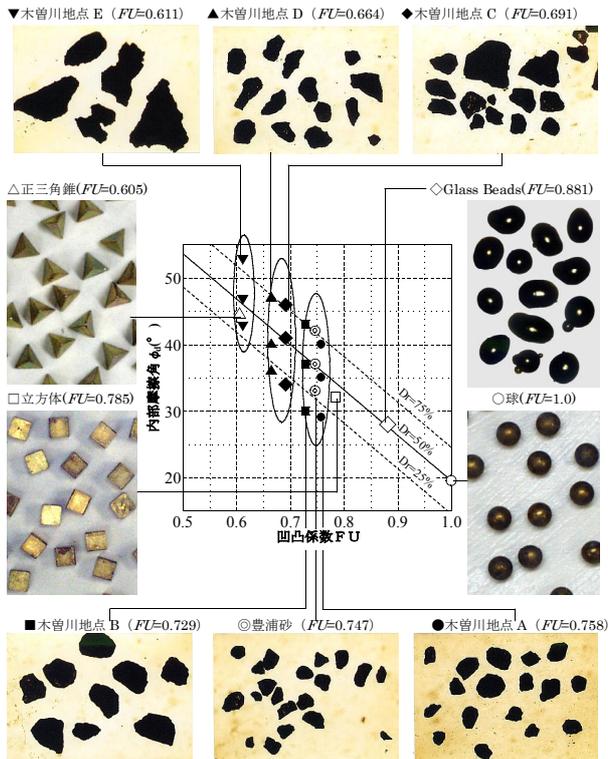


図-3 内部摩擦角 ϕ_d と凹凸係数 FU の関係

3. 理学情報・工学情報の融合を目指して

3.1 濃尾平野臨海部ボーリング試料の分析

濃尾平野臨海部で採取された日本道路公団名古屋建設局（現 中日本高速道路株式会社）提供の標準貫入試験試料（深度約 100m）について、粒度試験および粘性土について液性限界試験・塑性限界試験、砂質土について形状分析を連続的に実施し、海面変動あるいは堆積年代との関係をまとめた。

濃尾平野臨海部ボーリングコアの観察から明らかにされた伊勢湾周辺地域の海面変動とその層序を深度に対応させて作図したのが図-4である。濃尾平野臨海部では約1万年前の濃尾層上部が深度約 40m、約 15 万年前の熱田層下部が深度約 80m に存在しており、当然のことながら、深度が深いほど上載圧力が大きいため圧密圧力が大きく、同じ土層厚に対して年月が圧縮された形となっている。図には細粒分(75 μ m 以下)含有率および液性限界 w_L ・塑性限界 w_P の関係を併せて示しており、海面変動と細粒分含有率および w_L 、 w_P の変化は極めてよく対応しており、特に w_L は海面変動に最も敏感に対応していることがわかる。これは、砂系から粘土系、粘土系から砂系への変化、すなわち粒度の情報は、氷期・間氷期、海進・海退の繰り返しによる海面変動を推定するための重要な情報であるが、土質工学的な情報である液性限界・塑性限界もまた、海面変動を敏感に反映する指標になり得ることを意味している。また、この結果は、地盤を理学・工学の両視点から分析することが大変意味のあることを示している一例とも言える。

3.2 理学・工学の接点と融合に向けて

上述3.1のようにわが国の代表的な沖積平野である濃尾平野を研究対象にして、自然に堆積する土の特徴を平面的および深度方向に分析し、運搬に伴う淘汰や海進・海退に伴う上方粗粒化・細粒化などの堆積時あるいは堆積後の環境を推定する。濃尾平野沖積層の砂質土については、図-5に示す概念図のように、堆積土の平面位置と深度から堆積環境を把握し、さらに物理的性質の推定、さらに上述2.の研究成果との融合により、せん断強度の推定を試みる。すなわち、深度や原位置の地理的な情報のみか

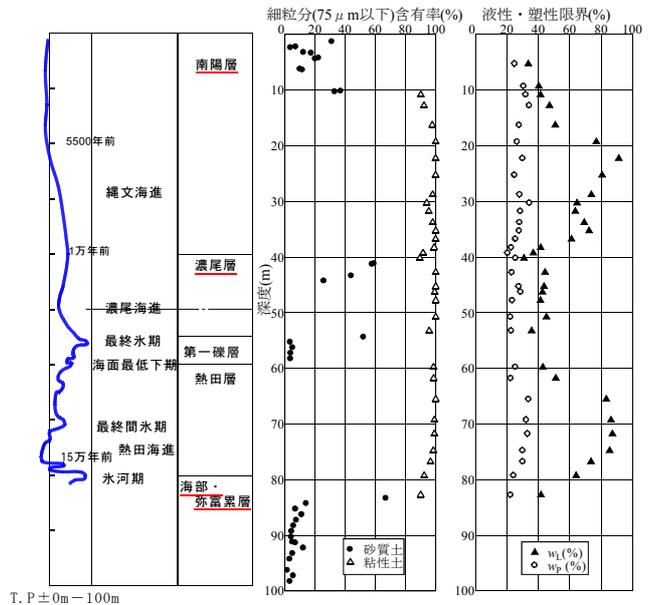


図-4 海面変動と物理特性の変化

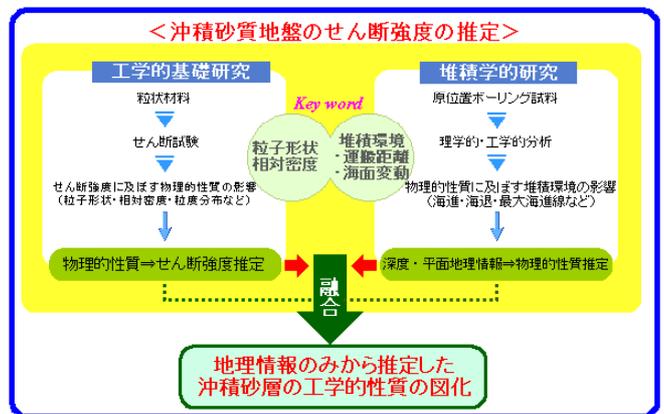


図-5 理学・工学融合の概念図

ら主として砂質土の物理的性質、液状化判定やせん断強度の推定を行うことを最終目標としている。

4. おわりに

1. で述べて筆者の夢や試みを現段階の研究結果で紹介した。特に、二点目の課題についてはまだまだ十分な成果は得られていないが、筆者はこれまで理学の分野で行われてきた領域に対して、工学的な切り口で堆積環境を推定する意義は理学と工学の境界領域を埋める意味でも大きいと考えており、さらなる解明を続けられるよう努力するつもりである。

参考文献

- 1) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義，土と基礎，Vol.12, No.4, pp.17～24, 1964.
- 2) 吉村優治・小川正二：粒状体の間隙比およびせん断特性に及ぼす一次性質の影響，土木学会論文集，No.487/III-26, pp.99～108, 1994.3.
- 3) 吉村優治・小川正二：砂の等方圧密およびせん断特性に及ぼす粒子形状の影響，土木学会論文集，No.487/III-26, pp.187～196, 1994.3.
- 4) 吉村優治・松岡 元：粒子形状による粒状体の内部摩擦角の推定法，土と基礎，Vol.50, No.5, pp.20～22, 2002.5.
- 5) Terzaghi, K. and Peck, R.B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, p.82, Wiley, New York, 1948.
- 6) 吉村優治・小川正二：砂のような粒状体の簡易な定量化法，土木学会論文集，No.463/III-22, pp.95～103, 1993.3.

問合せ先：
 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科 吉村優治
 (住所：〒501-0495 岐阜県本巣市上真桑 2236-2)
 【Tel:058-320-1401 Fax:058-320-1263 E-mail: yuji@gifu-nct.ac.jp】