

「粒度評価径」の提案とそれに基づく 日本統一土質分類法の分析

福田光治¹・宇野尚雄²

¹正会員 工修 大阪土質試験所 技術1部 (〒550 大阪市西区立売堀4-3-2)

²フェロー 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜県岐阜市柳戸1-1)

本論文では、「個数による粒度分布」に基づいた「粒度評価径」と称する指標を新たに提案して、土質分類法を一個の数値指標で整理することを試みた。そして従来の分類土質名とCBR値、内部摩擦角、透水係数、中間土分類等との関係を考察・分析した結果、極めて良好な判断ができる指標であることを示した。この結果を利用して、地盤堆積土の粒度、各種工法に適正な粒度、液状化粒度等の分析例を提示した。

Key Words : grain size distribution, method of classification of soils, CBR, intermediate soil

1. はじめに

通常、粒度特性を表現する方法として土粒子の組成をもとにした土質分類名、粗粒分含有率、細粒分含有率、均等係数 U_c 、10%、20%、50%粒径あるいは $2\mu\text{m}$ 以下の含有率など様々な指標が用いられている。このうち日本における分類法の中心的位置にあるのは日本統一土質分類法で、この方法は分類名を用いて土質を区分することを基本的な考え方としている。しかしこの分類名と土質工学的諸性質の定量的関連性がいまいである。

本研究では、粒度分布を基礎にした土質分類方法として、粒度分布を一個の指標となる連続した数値であらわす方法を示している。そして、この分類指標を粒度評価径と称し、土の基本的な力学特性である透水係数と有効応力条件の内部摩擦角等とを関連させることによって、より定量的な分類方法としての位置づけを行おうとすることを目的としている。

土の粒度分布を物理的・体系的に裏づけられた1個あるいは数個の代表的な指標で示すことができるならば、不均一な地盤特性の分布を示すことも容易になり、全体的な地盤特性の把握を助けることが期待できる。本論文は著者らの一連の研究^{1)・2)}から、粒度特性を示す指標を提案し、その有効性を検証するとともに、この指標を用いて日本統一土質分類法の構造的分析を行ったものである。

2. 粒度特性を示す「粒度評価径」の定義

著者らは、粒度分布の対数正規分布性に着目し、平均的な間隙径や水膜厚さに対応した概念として式(1)、(2)に示される平均間隙径深 h (mm)、平均間隙水膜厚 b (mm)を提案した³⁾。これらの式は土質分野で一般に用いられている質量表示の粒度分布を基礎にして個数表示の粒度分布の代表値である平均径を誘導し、球形モデルを仮定して求めたものである。

$$h = \frac{0.3 d_{50}}{\exp \{0.5 (0.484 + 0.420 \ln U_c)^2\}} \cdot \frac{e}{G_s} \quad (1)$$

$$b = \frac{0.3 d_{50}}{\exp \{0.5 (0.484 + 0.420 \ln U_c)^2\}} \cdot w \quad (2)$$

ここに、 d_{50} : 50%粒径(mm)、 U_c : 均等係数、 e : 間隙比、 G_s : 比重、 w : 含水比(小数で表示)である。

間隙を土粒子の表面にはりつけ、平均深さとして求めた式(1)の平均間隙径深 h は長良川シルト等を用いた実験³⁾等により、物理的意義を確認している。

そして、式(1)、(2)をもとに、透水係数や内部摩擦角との力学的関連を研究し、式(3)、(4)で示される近似的な関係式を示した^{4)~6)}。

$$\log k = 2.87 (1 + \log b) \quad (3)$$

$$\tan \phi' \cong 0.85 \frac{d_{10}^{0.09}}{h^{0.02}} \quad (4)$$

ここに、 k : 透水係数(cm/s), ϕ' : 有効応力表示の内部摩擦角($^\circ$)で、 b (mm), h (mm), d_{10} (mm)のときの関係である。

式(3)は砂から粘性土まで広範な粒度に適用できることが示されている³⁾。また、式(4)の推定精度は $\pm 4^\circ$ であることが李⁷⁾によって指摘されている。従って式(1), (2)によって平均間隙径深 h や平均水膜厚 b が既知となれば、不飽和土も含めた透水係数と有効応力表示の内部摩擦角が推定できることを示し、2つの概念は有効な情報を与えていると考えることができる。

式(1), (2)の平均間隙径深 h や平均水膜厚 b は粒度特性を示す項と間隙比や含水比などの二次的素材を示す項との積で表されている。そこで粒度特性から求められる項だけを分離し、式(5)を定義して、これを「粒度評価径」 d_c (mm)とすることを考える。

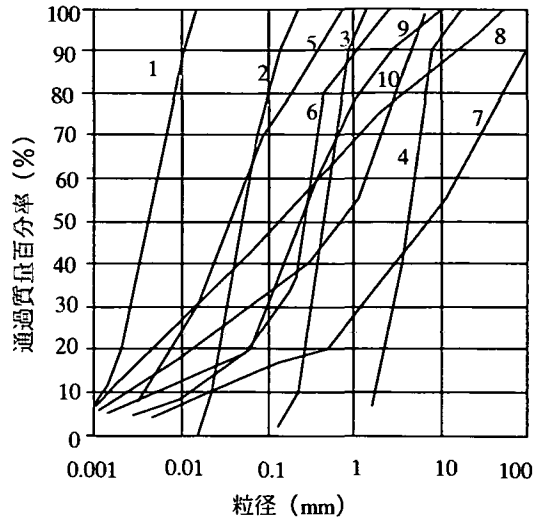
$$d_c = \frac{0.3d_{50}}{\exp\{0.5(0.484 + 0.420 \ln Uc)^2\}} \quad (5)$$

粒度分布から得られる「粒度評価径」 d_c だけでは力学的特性を推定することはできないが、間隙比 e と含水比 w の範囲が与えられるならば、透水係数や内部摩擦角を概略的に推定することが可能となる。この意味で式(5)に示される d_c を「粒度評価径」と呼び、これに基づく方法を「粒度評価径法」と呼ぶことにした。

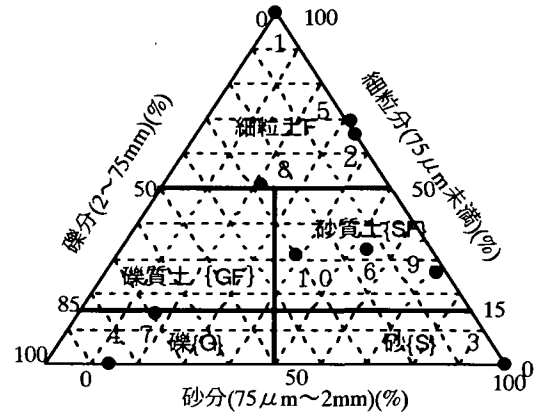
粒度分布を確率分布関数で近似化し、この近似化の過程で求められる指数によって粒度分布を代表する方法はTalbotの式⁸⁾や板橋ら⁹⁾、福本¹⁰⁾の研究に見られる。彼らはまさ土等の風化過程をこれらの指標の変化で表わすことを試みている。またAASHTOの分類方法は粒度組成とコンシステンシー特性を組み合わせた連続量である群指数¹¹⁾を分類名に併記している。本研究で用いた粒度評価径法をこのような研究の流れに位置づけることができるが、ここで提案する粒度評価径法の特徴は工学的特性により密接に関係させていることである。

3. 粒度評価径法による土質分類の可能性

本節では、仮定した粒度分布曲線を用いて日本統一土質分類法と粒度評価径法の相互関係について検討した結果を示す。なお、日本統一土質分類法は



(a) 粒径加積曲線



(b) 三角分類

図-1 粒径加積曲線と三角座標分類

1973年に土質工学会基準として制定された後1990年と1996年に改訂されている¹²⁾。本研究で研究対象とした分類法は土質試験法第3回改訂版に示された土質工学会基準(JSF M 111-1990)¹³⁾である。

(1) 日本統一土質分類と粒度評価径法の類似性

図-1(a)は粒度分布の種々のパターンを概念的に示したものである。想定した粒度分布はこれからの展開を容易にするため10%粒径 d_{10} が1 μ m以上の場合である。

図-1(b)は、図-1(a)の粒度分布の組成上の位置関係を明確にするため三角座標で示したものである。試料No.1~4は粒度分布が平行する相似粒度、No.5~8

表-1 粒度特性の諸量

試料 No.	d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	U_c	粒度評価径 d_c (mm)	粒度組成 (%)			分類名
						礫分	砂分	細粒分	
1	0.0058	0.0046	0.0041	4.1	7.73×10^{-4}	0	0	100	F
2	0.069	0.056	0.02	3.5	1.02×10^{-2}	0	35	65	F
3	0.53	0.45	0.2	2.7	9.09×10^{-2}	0	100	0	{S}
4	4.9	4.1	1.8	2.7	8.20×10^{-1}	85	15	0	{G}
5	0.053	0.031	0.004	13.3	2.73×10^{-3}	0	33	67	F
6	0.28	0.16	0.017	16.5	1.22×10^{-2}	14	54	32	{SF}
7	14	8.5	0.032	437.5	2.56×10^{-2}	69	17	14	{G}
8	0.27	0.065	0.013	207.7	4.81×10^{-3}	25	24	51	F
9	0.22	0.18	0.0058	37.9	7.21×10^{-3}	2	72	26	{SF}
10	1.4	0.76	0.002	700	1.23×10^{-3}	30	39	31	{SF}

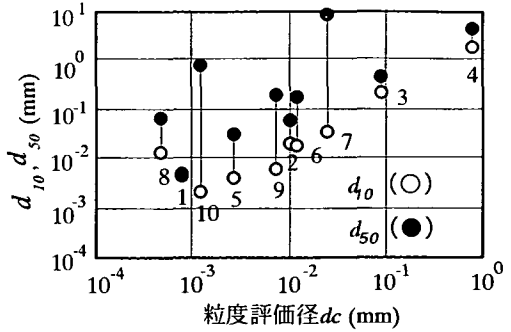


図-2 粒度評価径と d_{10} , d_{50} との関係

はある最大粒径以上をカットした尖頭粒度の関係を想定している。三角座標分類ではNo.1, 2, 5, 8は細粒土F, No.3は砂 {S}, No.6, 9, 10は砂質土 {SF}, No.4, 7は礫 {G} に分類され、殆ど全ての土質に対応する粒度分布を包含していると考えられる。No.1~4は $U_c=2.7\sim 4.1$ の範囲にあり、均一的な粒径の試料である。これに対し、No.5~No.10は $U_c=13.3\sim 700$ と幅広くばらついており、粒度配合の良い試料に対応している。

表-1, 図-2は図-1で示された粒度分布を粒度評価径との関係で整理した結果である。なお、図-2では粒度評価径 d_c と10%粒径 d_{10} の間に強い相関が見られるが、50%粒径 d_{50} との関係は均等係数 U_c が大きいとき、相関が悪い。

図-1(a)に示した10試料の三角座標上の位置関係と、図-2の粒度評価径座標上の位置関係を調べ日本統一土質分類法と粒度評価径法における相対的位置関係の対応性によって類似性を判断する。No.1~4の相似粒度の試料は三角座標分類では大別してNo.1, 2は細粒土Fに、No.3, 4は砂 {S} あるいは礫 {G} の二つの土質に分類される。粒度評価径は、No.1, 2が 10^{-4} , 10^{-2} (mm)であり、No.3, 4が 10^2 , 10^1 (mm)のオーダーで、No.1, 2に比べNo.3, 4の粒度評価径が大きく、また {G} に属するNo.4の値が最も大きいことから粗粒土、細粒土、礫、砂の分離は可能であり、日本統一土質分類における区分に対応させることができる。粒度配合のよいNo.5~10の試料についても同じような結果を与え、細粒土 {F} には粒度評価径 10^3 , 10^4 (mm)が対応し、{SF}, {G} の試料の粒度評価径は 10^3 (mm)以上になり、また {SF} よりも {G} の値が大きいため日本統一土質分類法の分類と類似性があることを示している。

(2) 日本統一土質分類法と粒度評価径法の相異性
図-1から得られる工学的イメージと図-2から得られるイメージはやや異なった関係も示している。均等係数が小さい相似粒度のNo.1~4の試料の位置関

係は三角座標でも粒度評価径座標でも相互の位置関係は同じ傾向を示し明確に分離することができる。

しかし均等係数が大きいNo.5~No.10の場合はこの傾向は異なってくる。図-1(a)のNo.5はNo.1~3の中間で特にNo.2に近く、また三角座標上でもNo.5とNo.2はほぼ同一位置にある。これに対し、図-2のNo.5はNo.2から離れて、No.1とNo.2の中間に位置している。No.6は粒度分布上でも、三角座標分類でもNo.2とNo.3の中間に位置しているが、図-2ではNo.2と同じ位置になり、No.2に類似した特性が予想される。

以上のように図-1, 2の位置関係の検討結果では、均等係数が小さい均一的な相似粒度の場合は、三角座標分類と粒度評価径座標における各々粒度の位置関係は類似した関係を与えており、粒度評価径も分類法指標として有効であることを示している。しかし均等係数が大きくなると、三角座標分類と、粒度評価径による整理方法では、相互の位置関係が異なってくる。これは分類法上重要な問題と考えられる。

従って以下に粒度評価径法と土質工学的特性との関係を分析することにより、従来の日本統一土質分類法が包含した土質特性を、粒度評価径法で分類できるか否かを検討する。

4. 粒度評価径法によるCBR特性の分類

(1) 日本統一土質分類法におけるCBR特性の表現
土の粒度分布は、試験方法や利用方法において、種々の問題が指摘されているが、地盤条件や工法選定の判定に欠かすことのできない基準を与えている。

日本統一土質分類法における粗粒土の分類基準は細粒分含有率15%により、きれいな砂(礫)と砂質土(礫質土)に分けられ、細粒分含有率50%によって粗粒土と細粒土に区分される。また、均等係数 U_c と曲率係数 U_c' を用いて、粒度の混ざり具合を表示し、

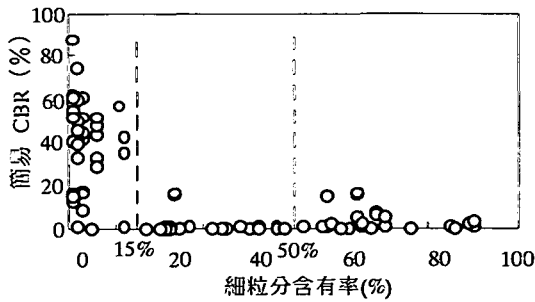


図-3 細粒分含有率と簡易CBRの関係

「粒度がよい」 $U_c \geq 10, 1 < U_c' < \sqrt{U_c}$
 これ以外は「粒度が悪い」と表現している。これらは植下ら^{14), 15)}のCBRと粒度に関する研究から導かれたものである。ちなみにアメリカ統一土質分類法では

粒度がよい礫 $U_c \geq 4, 1 < U_c' < 3$

粒度がよい砂 $U_c \geq 6, 1 < U_c' < 3$

であり、類似した分類方法であっても基準となる数値は国によって若干異なっている。そこで本節では分類法としての粒度評価径法の有効性を示す一環として、まず、こうした歴史的研究に対する成果を検討することによって、粒度評価径法が過去の研究成果をどのように反映することができるかを考察する。植下らの研究^{14), 15)}では修正CBR（最大乾燥密度の95%密度CBR）が用いられているが、本研究では簡易CBRを用いた。簡易CBR値は一層67回3層突き固め、4日水浸後に貫入するという簡易CBR試験結果で、主として2.5mm貫入時の値である。このため、まず植下らの用いた修正CBR特性と、本研究で用いた簡易CBR特性の類似性を調べる。なお、使用したデータは名古屋周辺の洪積層等を対象とした167ケの試験結果である。

図-3は細粒分含有率と簡易CBRの関係を示している。日本統一土質分類法にある15%、50%の細粒分の基準はこのような図で示された修正CBRとそのばらつきから根拠づけられている。図示されているように簡易CBRは細粒分含有率が大きくなれば簡易CBRとばらつきも小さくなる傾向が見られ、15%以下の細粒分含有率の範囲では平均37.5、標準偏差21.6で、かなりばらつきが大きい。細粒分含有率が50%以上になると簡易CBRは平均値3.4、標準偏差は4.9になり、ばらつきも顕著に小さくなる。従って簡易CBR試験結果では細粒分含有率50%の基準線の意義が不明瞭であるが15%ラインは有効であることを示している。

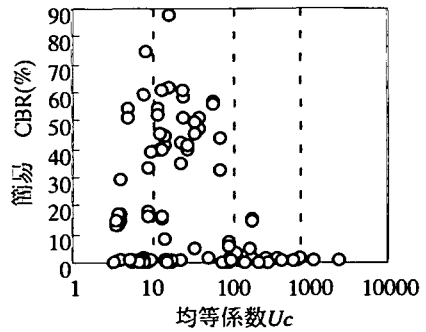


図-4 均等係数と簡易CBRのばらつき

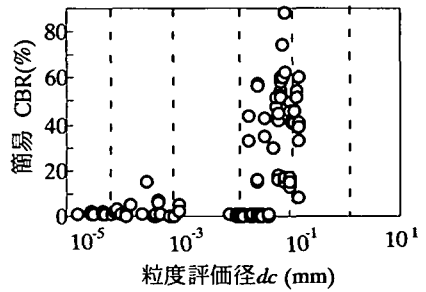


図-5 粒度評価径と簡易CBR

図-4は均等係数 U_c と簡易CBRの関係を示している。植下ら¹⁵⁾は細粒分含有率～修正CBRの関係と同様に、修正CBRのばらつきと平均的な値からこれらの特性を検討し、分類基準の指標として均等係数 $U_c = 10$ を導いている。図-4は植下らが用いた修正CBRの特性と類似した傾向を示し、均等係数が増加するに従いばらつきは大きくなることを示している。しかし、このようなデータからは均等係数 $U_c = 10$ を分類基準とすることは困難である。また均等係数が100以上になると図-4ではばらつきが小さくなり、必ずしも均等係数だけでばらつき特性を整理することはできない。植下らはこのため均等係数 U_c の他に曲率係数 U_c' と組み合わせればらつきを排除しようとしている。

以上の整理結果から明らかなように、使用した簡易CBRデータは植下らの用いた修正CBR特性と類似した傾向を示し、日本統一土質分類法に含まれた内容を反映していることが分かった。

(2) CBR特性区分点に相当する粒度評価径

図-5は図-3のデータを用いて粒度評価径法により再整理したものである。図によると粒度評価径法による分類でも図-3と同様、大きなばらつきを除去することはできない。しかし、植下らの整理方法に従って、ばらつきの傾向及び平均値を用いて評価すると、

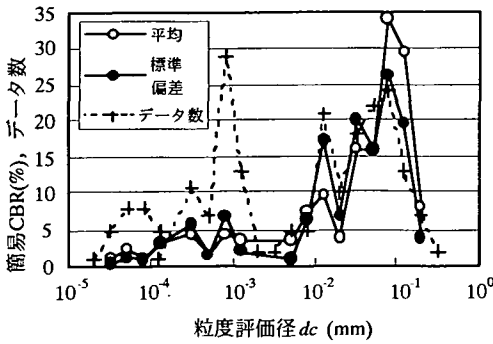


図-6 粒度評価径と簡易CBRの特徴

粒度評価径 $d_c \geq 10^{-2}$ (mm)の範囲では簡易CBR値は急激に大きくなり、また植下らの細粒分15%以下のばらつきと類似した傾向を示して、平均値25.1、標準偏差24.2になった。 $d_c = 10^{-3} \sim 10^{-2}$ (mm)のデータが少ないが、 $d_c \leq 10^{-3}$ (mm)になると平均値もばらつきも小さくなり、平均値2.1、標準偏差3.5で植下らが示した細粒分含有率50%以上の特性と類似した傾向を示している。従ってCBR値のばらつき特性の類似性から粒度評価 $d_c = 10^{-2}$ (mm)は植下らが示した細粒分15%に、粒度評価 $d_c = 10^{-3}$ (mm)は細粒分50%のCBR特性区分に、それぞれ対応しているといえよう。また、 $10^{-2} < d_c < 10^{-3}$ の範囲は遷移領域にあたる。

さらに、これらの特徴の連続性を明らかにするため粒度評価径の区間毎の平均値と標準偏差を求めたのが図-6である。この図は図-5と同じデータに基づいていて、その横座標は、対数で0.2毎に区分されている。図-6はデータ不足のため凹凸はあるが、粒度評価径 d_c が大きくなると簡易CBR値と標準偏差は大きくなる傾向を示している。また、簡易CBRデータは d_c が 10^{-2} (mm)以上になると 10^{-2} (mm)以下に比べて大きく変化することも示している。

図-3~6の検討結果として次の2点が得られ、 $d_c = 10^{-2}$ 、 10^{-3} (mm)がCBR特性の分類上の指標になってくることがわかる。

- ①細粒分含有率15%以下になると簡易CBRは急激に大きくなるが、50%を越えると10以下となる。これらの傾向は植下らの修正CBRデータと類似している。
- ②粒度評価径による分類では $d_c \geq 10^{-2}$ (mm)の場合、平均CBRも高く、標準偏差も大きい。が、 $d_c \leq 10^{-3}$ (mm)になると、簡易CBRは10以下となる。

(3) 粒度評価径法によるCBR特性の分析

植下ら¹⁹⁾は細粒分含有率15%以内のデータにみられる修正CBRのばらつきを整理するため均等係数 U_c 、

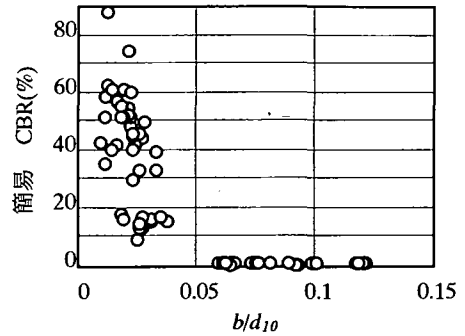


図-7 粒度評価径 10^{-2} (mm)以上の簡易CBR

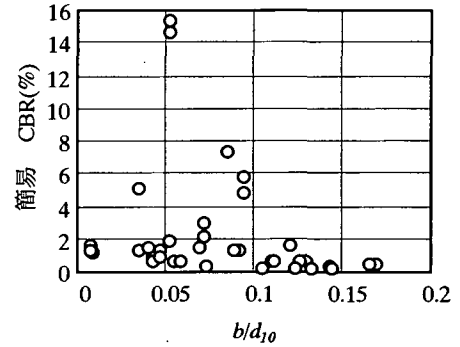


図-8 粒度評価径 10^{-2} (mm)以下の簡易CBR

曲率係数 U_c' の2つの特性値を導入しなければならなかった。

本節では粒度評価径法の役割を明らかにするため簡易CBR特性と粒度評価径との定量的な関係を検討する。

図-7は粒度評価径 $d_c \geq 10^{-2}$ (mm)の試料のデータを $b/d_{10} \sim$ 簡易CBRで整理したものである。ここで平均間隙水膜厚 b は式(2)より $b = d_c \cdot w$ で示される。 d_{10} は10%粒径で、図-2では d_c と相関が強いこと、CBRのばらつきには含水比や間隙の接近度の影響も大きいことに配慮して、平均水膜厚 b を d_{10} で無次元化している。図によると図-3~6では非常にばらつきが大きかったデータ領域が、図-7ではばらつきが整理されて、一定の傾向がみられ、全体的には、簡易CBRは b/d_{10} あるいは $(b/d_{10})^2$ に反比例するような関係にあることを示している。さらに b/d_{10} の領域で考えると、以下の2ゾーンに区分することができる。

① $b/d_{10} \leq 0.05$: 簡易CBRは b/d_{10} の変化に非常に敏感に対応し、簡易CBR=12~60以上に变化する。

② $b/d_{10} \geq 0.05$: 簡易CBRは1~2以下で非常に小さくなり、 b/d_{10} の影響は小さい。

従って、 $d_c \geq 10^{-2}$ (mm)の試料について粒度評価径 d_c が既知となれば、含水比 w の変化による簡易CBRの

変化も図-7からより定量的に推定できる可能性を示している。

次に $d_c \leq 10^2$ (mm)の試料のデータを整理したものが図-8である。簡易CBR値は大部分5以下で b/d_{10} の影響は小さいが b/d_{10} に反比例するような傾向は見られる。

以上の結果から簡易CBRの分類に関して、ここで示した粒度評価径 $d_c=10^2$ あるいは 10^3 (mm)を境界とする方法によって日本統一土質分類法の分類方法と同様の結論を導きだすことができることが分かった。しかも連続量として1個の粒度評価径でCBR特性がある程度区分できることは細粒含有率、均等係数 U_c 、曲率係数 U_c' を考慮した従来の方法より簡便な分類方法として位置づけることができる。

5. 粒度評価径法による日本統一土質分類法の構造特性

(1) 日本統一土質分類法と粒度評価径法の関係

粒度評価径法の立場からは、日本統一土質分類法による同一分類名内の土であっても土質特性は変動する可能性があること、また分類名間の土質諸特性の変化は連続的であることが予想される。このため日本統一土質分類法で分類したとしても種々の粒度指標等を追加して経験的判断を加えなければならず、初心者にはなかなか会得し難い面が含まれている。また、設計では、粘性土と砂質土の体系は非常に異なっており示されているが、その境界にある中間土は、幅広い複雑な粒度分布を示しており、現状の日本統一土質分類法では取扱いが困難な領域になる。

この節では、まず日本統一土質分類法と粒度評価法の関係を調べ、分類名の境界、範囲などを検討する。次に統一土質分類法体系と関連させて示されている内部摩擦角と透水係数の範囲と、粒度評価径法による推定値との対応性を調べる。

使用したデータは主として土質工学研究発表会講演概要集¹⁶⁾等から収集したものである。なお、細粒分の多い試料は $d_{10} < 0.001$ mmとなり、 d_{10} が求まらないデータもあるが、この場合、粒度分布をなめらかに外捜し10%通過率との交点により d_{10} を推定した。

図-9は、粒度評価径 d_c と日本統一土質分類法に示される分類名の関係を示したものである。調べた分類は、分類名31項目中18分類である。特殊土に対応する火山灰、有機質土を除けば20分類名であり、一般的に研究対象となっている土質の分野を反映したものと見える。

収集したデータは試料総数312ヶで、分類名ごとに比較するとかなりばらついた収集状況である。

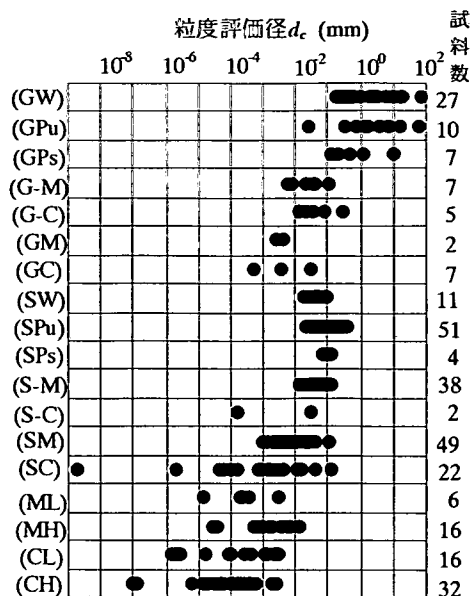


図-9 粒度評価径と日本統一土質分類名

しかし、傾向的には、粒度評価径は各分類に対応して変化していることを示している。つまり、礫粒土、砂粒土、細粒土と粒径が小さくなるに従い、粒度評価径の大きさが順次小さくなっていること、また、礫粒土のような大分類内でも、細粒分の含有量に応じ、粒度評価径に大小関係がみられることなど分類手法上の基準として対応できることを示していると考えることができる。

(2) 日本統一土質分類法と工学的性質

図-9により日本統一土質分類法と粒度評価法との関係が示された。この節では粒度評価法の有効性を示すために、有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' と飽和時の透水係数 k をとりあげ、フィルダムで提案されている土質分類と土質特性¹⁷⁾との範囲に対して分類名に対応させた粒度評価径からの推定値が対応しているか否かを検討した。

計算結果を整理したのが表-2である。粒度評価径の範囲は図-9から求めた。透水係数、内部摩擦角は式(1)~(4)から推定した。なお、最頻値は最大の度数分布を示す値であり、比重 G_s については全ての分類について便宜的に $G_s=2.65$ を用いた。

図-10は表-2の結果を図化したものである。図によると(SW)の ϕ' 及び(CL), (CH), (SC)など細粒土の飽和透水係数 k の下限値について検討を要するが全体的な傾向はほぼ対応しているものと考えられる。従って、分類名に蓄積された力学的特性も粒度評価

表-2 土質特性の比較

	粒度評価径の範囲			文献 17)			** d_c に対応した推定値		
	下限値 (mm)	最頻値 (mm)	上限値 (mm)	e	ϕ (°)	k(cm/s)	下限値	最頻値	上限値
(GW)	2×10^{-1}	4×10^{-1}	1×10^2	*(0.37)	>38	1×10^{-3} 1×10^{-1}	38	40	47
(GP)	1×10^{-1}	4×10^{-1}	1×10^2	*(0.37)	>36	5×10^{-4} 5×10^{-2}	37	40	47
(SW)	1×10^{-2}	4×10^{-2}	1×10^{-1}	0.37±	38±	5×10^{-4} 5×10^{-1}	33	35	37
(SP)	2×10^{-2}	1×10^{-1}	5×10^1	0.50± 0.03	36±1	5×10^{-5} 5×10^{-1}	34	37	40
(S-M)	1×10^2	4×10^2	1×10^3	0.41± 0.02	33±3	—	33	35	37
(SM)	1×10^{-3}	1×10^{-2}	5×10^{-2}	0.48± 0.02	34±1	1×10^7 5×10^5	29	33	36
(SC)	5×10^{-5}	1×10^{-3}	5×10^{-2}	0.48± 0.01	31±3	1×10^{-8} 1×10^{-5}	24	29	36
(CH)	1×10^{-5}	2×10^{-4}	1×10^{-3}	0.80± 0.04	19±3	1×10^{10} 1×10^{-8}	21	26	28
(CL)	1×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	0.56± 0.01	28±2	1×10^{-8} 1×10^{-6}	25	27	31

* 間隙比eが掲載されていないので、(SW)の値を使用
 ** 推定値は上段が ϕ (°), 下段がK(cm/s)である

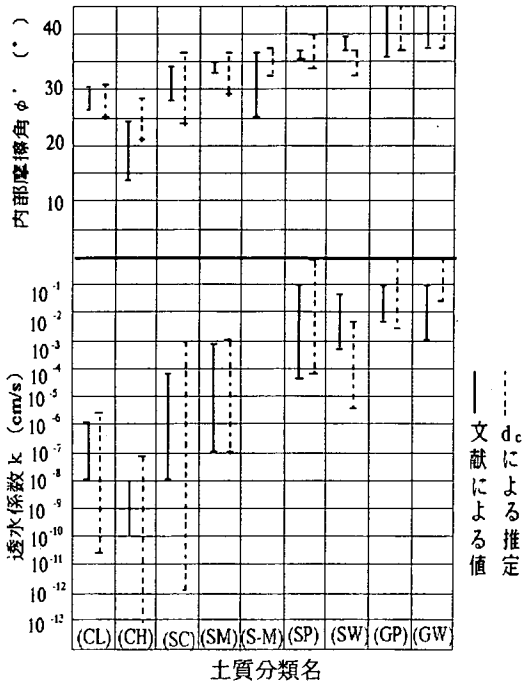


図-10 粒度評価径法による分類と力学特性

径法は包含できることを示している。

(3) 分類に使用される粒度組成の一般的比較

一般に対象とする土質材料は純粋な粘土や砂だけでなく、いわば両者が混合する中間土¹⁸⁾であることも多い。日本統一土質分類法では(S-M)～(CL)等に分類されるが、中間土として特別に砂分含有率や細粒分含有率あるいはアッターベルグ限界などに

表-3 各国・各機関の分類における粒度組成

	粗粒土			細粒土
	砂と礫の区分 礫含有率(%)	粗粒土 粗粒分含有率(%)	区分の基準となる 細粒分含有率(%)	区分の基準となる 細粒分含有率(%)
ASTM	50	50	5, 12, 50	—
AASHTO		65	10, 15, 25, 35	—
FAA		55	15, 25, 35, 45	—
イギリス	粗粒分の50%	50	5, 20, 50	50, 70, 100
ドイツ	40	60	5, 15, 40	—
スイス		49	5, 15, 49	—
日本の統一分類	礫分と砂分の 大小	50	5, 15, 50	—

より定義されている。しかし、中間土も粘土や砂と同じ粒度評価径 d_c という座標上の位置的關係で示されることは、その力学的特性を統一した場で把握することができることを示唆している。

中間土という概念は粒度組成と対応して使われ、砂分含有率や細粒分含有率が指標とされている。しかし、もっと一般的に考えると粒径や組成の境界と考えることもできる。土質分類名の確立の過程で、(1) 礫と砂の粒径区分点、(2) 細粒分含有率による土質分類のしかた、(3) 粒度の良否の判定基準が問題になったことが指摘¹⁹⁾されているが、ひとたび区分がなされると分類名間に必ず遷移領域が現われ、従って区分間の橋渡しをする手法が課題となる。本研究では粒度組成による区分点をとりあげ粒度評価径に対する関係を検討した。粒度組成についての各国、各機関の考え方を示したのが表-3²⁰⁾である。

表-3によると粗粒土の細粒分含有率は類似点と、若干異なった点がある。これらの違いが生じる原因として既往の研究では各国や各機関の事情、経験に根拠を求めること以上の成果は示されていない。しかし、類似した傾向のなかにも微妙に異なる区分法が存在していることは恣意的判断によらない土の構造が反映していると考えられる。つまり、中間土の研究は砂や粘土の中間に分類された土の特性を調べるためだけでなく、こうした区分の力学的背景を探ることも目的である。そして、表-3の結果を整理すると細粒分含有率として5～10%、15～25%、40～50%、70%付近に、土の分類からみた力学的特性の区分点が示されている。

図-11は試料総数329ヶに対する細粒分含有率と粒度評価径の関係を示している。ここで細粒分含有率とは75 μ m未満の含有率をあらわしている。全体的には細粒分含有率が小さくなると、粒度評価径は大きくなる傾向が見られ、細粒分含有率と粒度評価径

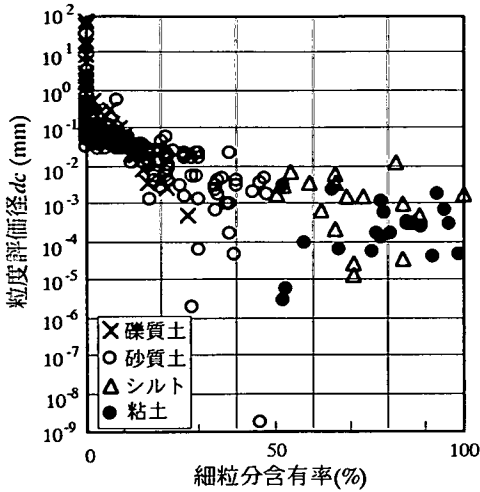


図-11 細粒含有率と粒度評価径

は対応している。従って粒度評価径は細粒分特性を含有していると考えることができる。細粒含有率と粒度評価径の関係及びばらつきから領域にわけて分類すると、以下の特徴が指摘できる。

- (1) 細粒含有率が10%以下ではほとんど $d_c > 1 \times 10^2$ (mm)であり、細粒含有率が0に近づくにつれて粒度評価径 d_c は急激に大きくなる。
- (2) 細粒含有率が10~20%では大部分が $10^3 < d_c < 1 \times 10^1$ (mm)で、細粒含有率が增大するに従って小さくなる。
- (3) 細粒含有率が20~30%では大部分が $1 \times 10^4 < d_c < 1 \times 10^1$ (mm)の範囲にあるが、ばらつきがやや大きくなる。
- (4) 細粒含有率が30~60%は、 $1 \times 10^5 < d_c < 1 \times 10^2$ (mm)の範囲にあり細粒含有率の増大に伴って粒度評価径は小さくなる傾向がみられる。
- (5) 細粒含有率が60~70%では $1 \times 10^4 < d_c < 1 \times 10^2$ (mm)の範囲でばらついているが、細粒含有率による変化はみられない。
- (6) 細粒含有率が70~100%では、細粒含有率によらず $1 \times 10^4 < d_c < 1 \times 10^3$ (mm)の間に多く分布している。

そこで各国の分類法で基準となっている細粒分含有率について粒度評価径を用いて詳細に考察したのが表-4である。表-4から、分類基準を考えると細粒分含有率5%、15%、70%は区分の意味が強く、それぞれ $d_c = 3 \times 10^2$ (mm), $d_c = 1 \times 10^2$ (mm), $d_c = 1 \times 10^3$ (mm)が対応しているが、他の含有率については、区分に用いる意味があいまいである。これは分類の根拠が粒径、細粒分含有率、均等係数や曲率係数などを用いて、締固め度、CBR、透水係数などの

表-4 分類法による細粒分含有率の特徴

細粒分含有率 (%)	粗粒分含有率 (%)	d_c の分布特性
5	95	全体として $d_c > 3 \times 10^2$ であり、砂分含有率が100%に近づくにつれ d_c 値は急激に大となる。
10	90	全体として $d_c > 3 \times 10^2$ の基準。細粒分含有率が10%以上であると $d_c < 3 \times 10^2$ 、10%以下であると $d_c > 3 \times 10^2$ である。
12	88	全体として $d_c > 2 \times 10^2$ の基準で、細粒分含有率が12%以下であるならば、ほとんど $d_c > 2 \times 10^2$ の傾向にある。12%以下では、 $d_c > 2 \times 10^2$ となる割合は少ない。
15	85	$d_c = 1 \times 10^2$ に際限しており、細粒分含有率が15%以上では $d_c = 1 \times 10^2$ の上下に分布しているが、15%以下になるとほとんど $d_c > 1 \times 10^2$ となる。
20	80	細粒分含有率20%付近では $d_c = 1 \times 10^3$ に分布しているが、傾向的には20%以下では $d_c > 1 \times 10^3$ となる割合が多く、20%以上では $d_c < 1 \times 10^3$ が大部分である。
25	75	細粒分含有率25%付近では $1 \times 10^3 < d_c < 5 \times 10^2$ に分布しているが、25%以上になると $d_c < 1 \times 10^3$ となる傾向がある。
35	65	細粒分含有率35%以上であるならば、大部分 $d_c < 10^2$ であるのに対し、35%以下では $d_c < 10^2$ となる傾向がある。
40	60	この付近での細粒分の若干の変化による d_c の変動はなく、 $1 \times 10^3 < d_c < 1 \times 10^2$ にばらついている。
45	55	細粒分の変化の影響はなく $1 \times 10^3 < d_c < 1 \times 10^2$ にばらついている。
50	50	40、45%の傾向と同様に $1 \times 10^3 < d_c < 1 \times 10^2$ にばらついている。
70	30	細粒分含有率が70%以上であるならば大部分 $d_c < 1 \times 10^2$ である。70%以下であると $1 \times 10^4 < d_c < 1 \times 10^2$ と広く分布している。

統計的変動特性を整理するなかで得られたもので、一般的な土の構造の概念を背景にして、各指標の相互関係を考慮した統一性が満足されていないためであろうと考えられる。図-9および表-4を参考にしながら、分類基準を提案すると表-5のように整理される。表-5と日本統一土質分類法を比較してみると、5、15%は対応しているが、粗粒土と細粒土を区分する50%がなく、新たに30、70%を加えた点が異なっている。これらについては十分に検討し、中間土の力学的特性を全体的、統一的に位置づけていく必要があるであろう。

図-11は砂質土だけでなく礫質土もプロットしてある。礫質土の特性も砂質土とほぼ同様の特性を示しているが、細粒分含有率が5%以下になると礫質土の粒度評価径は非常に大きくなる傾向がある。ところが、細粒分含有率が5~15%になると、砂質土の粒度評価径と類似した値になる。そして15%以上になると砂質土の粒度評価径よりも小さくなる傾向がみられる。つまり、礫質土の特徴は、細粒分含有率5%以下、15%以上の範囲にあらわれており、5~15%では砂質土と類似した力学的特性が考えられる。種々の土に関するこの分類方法の適否を検討する余地は残されているが、粒度特性が1個の粒度評価径 d_c で分類されることが可能であれば、工学的には便利な値になり、定量的な分類方法を構築する一契機になる。

表-5 粒度評価径 d_c による細粒分含有率の分類

細粒分含有率 (%)	d_c の特性
5	ほとんど $d_c > 3 \times 10^2$ であり、細粒分が少なくなると、 d_c の上限値は急激に大きくなる。
15	$1 \times 10^2 < d_c < 1 \times 10^3$ が大部分である。 d_c は細粒分含有率とほぼ直線関係にある。
30	$1 \times 10^3 < d_c < 4 \times 10^2$ にあり、傾向的には細粒分含有率と直線関係もみられるが、ばらつきが大きくなる。
70	$1 \times 10^3 < d_c < 1 \times 10^2$ にあり、細粒分含有率が増加すると d_c は小さくなる傾向がみられる。ばらつきは大きい。
	$1 \times 10^5 < d_c < 1 \times 10^3$ に分布しており、細粒分含有率の影響はみられない。

6. 粒度評価径法の応用

(1) 堆積砂との関係

図-12は文献²¹⁾のデータを粒度評価径 d_c で分類したものである。文献では細砂分、粗砂分、礫分、50%粒径、均等係数がとりあげられて堆積環境との関連が示されている。この中から $d_{50} \sim U_c$ の関係をとりあげて示したのが図-12の(a)である。二つの図では、50%粒径 $d_{50} \sim$ 均等係数 U_c と粒度評価径 $d_c \sim$ 均等係数 U_c の位置関係は3の後浜砂を除けばほとんど類似している。図(a)では河成砂、まさ土は粗粒で他の堆積条件の砂と異なった位置にある。また(a)では沿岸砂、風成砂丘、海成砂等は、同じようなグループとして把握できそうである。一方、文献の粒度に対応する粒度評価径 d_c は $3 \times 10^3 \sim 8 \times 10^2$ (mm)の間に分布しており、まさ土、河成砂は 4×10^2 (mm)以上に、その他のグループは $(3 \sim 8) \times 10^3$ である。従って、粒度評価法だけでも図(a)で示した特徴と類似した特性を予想することができ、粒度評価径 d_c による分類も可能であると考えられる。

(2) 施工管理法としての粒度

粒度評価法の力学的なイメージを明確にするため、施工分野で提案されている粒度分布と施工方法の関係を整理する。地盤改良工法の選定や液状化などの地盤条件の分類では粒度分布がよく使用され、判断基準の基礎データとして扱われている。しかし、粒度分布による分類の適用にあたっては、概略的であっても一々粒度分布をかかねばならない繁雑や、粒度範囲から一部はみでた場合の評価における困難さは避けられない。従って力学的に限定された分類方法であっても、粒度特性が粒度評価径法で分類することができるならば、迅速な判断が可能であり、また粒度分布を描く手間が省けるため他の粒度分布を基準にした工法選定との比較も容易に行うことができる。

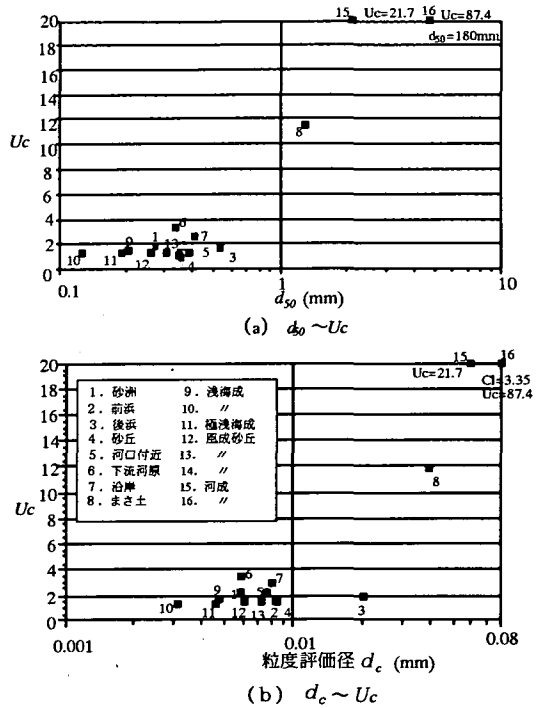


図-12 堆積条件の区分と指標

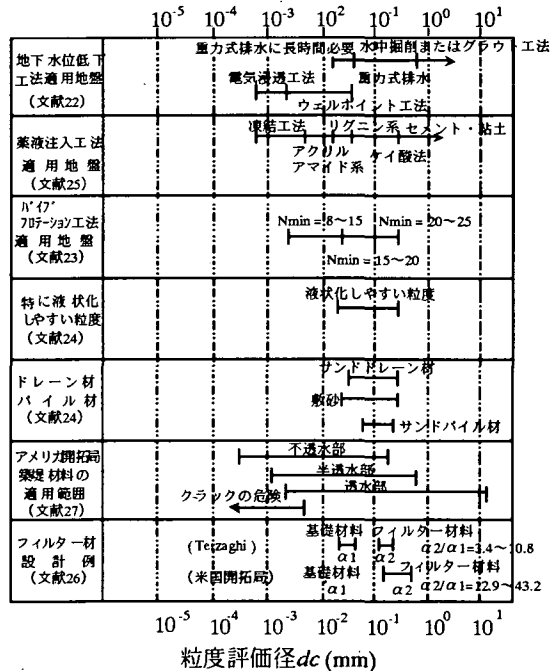


図-13 粒度評価径法による地盤条件・材料条件の区分

図-13は各種文献^{22)~27)}の中から、粒径加積曲線により工法の適用基準が示されている地下水位低下工法、薬液注入工法、バイプロフローテーション工法などの適用地盤、液状化しやすい粒度、ドレーン材、パイル材、築堤材料、フィルター材などの基準を粒度評価径法で整理したものである。従って粒度分布が与えられるならば、粒度評価径を計算し、他の工法と相互比較をしながら工法選定を判断することができる。また不均一な地盤が対象で、粒度試験により粒度分布が得られているならば、粒度評価径の深度方向分布により不均一性を示すことが可能で、しかもその特徴を加味できると考えられる。例えば液状化しやすい粒度は粒度評価径 $d_e=10^2\sim 10^1(\text{mm})$ に分布しており、この範囲はサンドドレーンや敷砂の粒度に類似していることがわかる。また、地下水位低下工法では重力排水に対応し、薬液注入工法ではケイ酸法になり、工学的な共通のイメージで包含できることを示している。また、粒度評価径 $d_e=10^3\sim 10^2(\text{mm})$ の範囲では地下水位低下工法として重力排水を適用することは困難で、電気浸透やウエルポイント工法が対象になることを示している。薬液注入工法では浸透工法は困難となり凍結工法の対象域になる。このように $d_e=10^3\sim 10^2(\text{mm})$ の範囲も工学的なイメージに対応していることがわかる。

(3) 液状化粒度

図-14は1995年兵庫県南部地震で液状化したまさ土²⁸⁾の粒度分布と、それまで液状化可能性範囲として示されていた粒度分布の範囲²⁹⁾を示した。設計論的にはこれまでまさ土の粒度分布は大部分が液状化可能ゾーンに比べ粗粒側にあるので液状化解析の対象にならなかった。しかし、この評価の過程では、まさ土と液状化発生ゾーンの粒度分布の違いが力学的にどの位あるのかは判断されていない。ところが粒度評価径を用いるならば従来の液状化ゾーンの粒度分布は図-13にも示したように粒度評価径 $d_e=2\times 10^2\sim 2\times 10^1(\text{mm})$ の範囲になる。これに対し、液状化しないとされていたまさ土の粒度評価径は $d_e=5\times 10^2\sim 2\times 10^1(\text{mm})$ ³⁰⁾になり、粗粒側ではあるが液状化可能範囲に含まれてしまい、従来の粒度曲線を用いた場合の比較結果とは異なった結論になる。そして兵庫県南部地震の経験ではまさ土も液状化しており、粒度評価径法にもとづく評価が現象に近いと考えられる。

(4) CBRと内部摩擦角

粒度評価径と間隙比、比重が既知になれば式(4)から内部摩擦角が推定できる。CBR値は基準となる貫

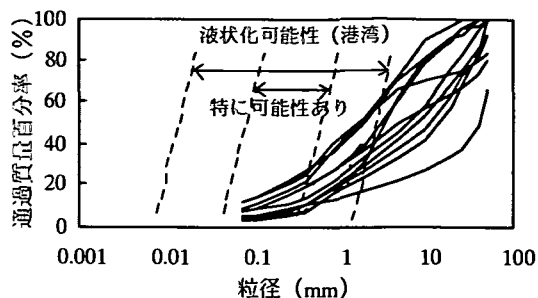


図-14 粒度と液状化可能性範囲

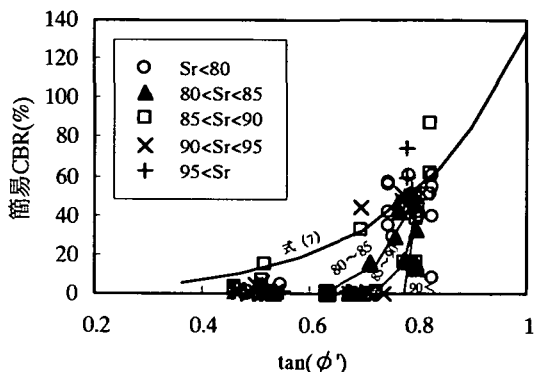


図-15 内部摩擦角と簡易CBR

入荷重に対する比であるから単位は無次元になるが、地盤反力係数や弾性係数等との関係が示されているように力学的特性を示すパラメータになっている。図-15は図-3と同じデータを用いCBR試料の粒度分布から式(4)により推定した内部摩擦角 ϕ' と簡易CBRの関係を示した。図中の飽和度を付けた細線は実験値の傾向を示している。

CBR試験は貫入棒のまわりに荷重板をおいて貫入させるため、上載圧による支持力問題と考えることができる。さらに砂を対象にして、粘着力を0と考えると、極限支持力、支持力係数は式(6)、(7)で示される。

$$q_t = P_0 \cdot N_q \quad (6)$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \exp(\pi \tan \phi') \quad (7)$$

ここに q_t : 極限支持力, P_0 : 押さえ分布荷重強度, N_q : 支持力係数である。図-15の実線は q_t/P_0 として式(6)、(7)より得られる支持力係数を示しており、CBRの平均的な傾向は特に $\tan \phi' > 0.8$ の範囲では式(6)、(7)のまわりにばらついており、飽和度の影響は見られない。これに対し、 $\tan \phi' < 0.8$ では、CBR値は飽和度が大きくなると推定値か

ら離れて急激に低減してゆき、飽和度が大きい程速く低減しはじめる傾向がみられる。

7. 結論

本論文では分類指数としての粒度評価径を提案し、日本統一土質分類法の分類基準を包含していることを示した。さらに、粒度評価径を用いて日本統一土質分類法の構造を分析するとともに、中間土の位置づけを行った。また、実務的な応用例も示した。

これらの研究結果は以下のように整理される。

- (1) 質量表示の粒径加積曲線から誘導される粒度評価径は連続した数値として、土質の分類に有効であり、また内部摩擦角や透水係数と関連させることができることを示した。
- (2) 日本統一土質分類法で均等係数、曲率係数を用いて表現されるCBR特性は粒度評価径法によっても日本統一土質分類法による結論と同様の結論を得ることができ、粒度評価径 $d_c=10^2, 10^3$ (mm) が分類区分値として対応することを示した。
- (3) 日本統一土質分類法の分類名に対応する粒度評価径の範囲を求め、この対応性の精度を確認するため日本統一土質分類法における内部摩擦角、透水係数の分布範囲と比較した。この結果、粒度評価径法で推定した力学範囲が対応しており、日本統一土質分類法に蓄積された力学特性を粒度評価径法が包含していることが明らかになった。
- (4) 中間土の工学的特徴も粒度評価径によって連続量として表現することができることを示した。特に区分点となる組成と粒度評価径の分析結果では、細粒含有率5, 15, 30, 70%が抽出され、諸機関の区分組成の意義を明らかにした。
- (5) 粒度分布を基準に提案されている種々の施工法の選択基準を、粒度評価径の分布範囲として整理し、各種施工法の適用地盤条件として提案した。
- (6) 粒度分布曲線による従来の基準ではまさ土は液状化材料と考えられていた。しかし粒度評価径の範囲から考えるとまさ土も液状化ゾーンに含まれることを示し、粒度分布の相異性、類似性を定量的に評価できることを示した。
- (7) 関係づけられた内部摩擦角 ϕ' を用いて、 $\tan \phi' > 0.8$ では飽和度の影響が小さくなるCBR特性を支持力理論観点から示した。一方、 $\tan \phi' \leq 0.8$ では飽和度がCBRに大きな影響を有する。

参考文献

- 1) 福田光治：重量による粒度分布と個数による粒度分布の相関について、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，pp.470-471，1988。
- 2) 福田光治，岩崎好規，諏訪靖二，宇野尚雄：粗粒材料の分類指標の提案，第21回土質工学研究発表会講演概要集，pp.113-114，1986。
- 3) 福田光治・宇野尚雄：透水係数に関する粒度分布と間隙指標，土木学会論文集，No.561/III -38，pp.193-204，1997。
- 4) 福田光治：熱土砂層の工学的特性，第23回土質工学研究発表会講演概要集，pp.187-188，1988。
- 5) 福田光治，諏訪靖二，小西憲一，中島伸一，井上隆夫：大阪湾岸埋込材の密度変化と粒度，第29回土質工学研究発表会講演概要集，pp.2079-2082，1994。
- 6) 福田光治，諏訪靖二，小西憲一，井上隆夫，中島伸一：大阪湾岸埋込材の内部摩擦角と尖頭粒度の強度特性，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集，pp.110-111，1994。
- 7) 李弘揆：礫質土の締固め特性とその強度に関する研究，名古屋大学学位申請論文，pp.141-142，1995。
- 8) 赤井浩一：盛土構造物特にアースダムの設計施工に関する基礎的研究，京都大学学位申請論文，pp.303-330，1957。
- 9) 板橋一雄，立石哲郎，田口泰敏：まさ土の粒子破碎に伴う粒度変化の評価，第25回土質工学研究発表会講演概要集，pp.287-288，1990。
- 10) 福本武明：粒子破碎機構に関する考察，第24回土質工学研究発表会講演概要集，pp.259-260，1989。
- 11) ASTM:D3282-83，pp.532-539。
- 12) 地盤工学会：第30回土質工学研究発表会-「土質工学から地盤工学へ」-工学的地盤分類方法，pp.1-2，1995。
- 13) 土質工学会：土質試験の方法と解説，土質工学会，pp.179-199，1991。
- 14) 植下協：2. わが国の土質分類法基準案確立までの経緯，土と基礎，Vol.20, No.11(177)，pp.78-83，1972。
- 15) 植下協・野々垣一正・浅井武彦：粗粒土の統一分類に関する考察，土木学会論文報告集，第194号，pp.103-112，1971。
- 16) 奥村哲夫：不攪乱土の液状化について，第10回土質工学研究発表会講演概要集，pp.325~328，1975。
- 17) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，第29章フィルダム，p.969，1965。
- 18) 土質工学会：ジオテクノート2中間土砂か粘土か，pp.1-17，1993。
- 19) 土の判別分類法基準化委員会：土質分類法ならびに分類結果表示法の基準案，土質工学会，土と基礎，Vol.20, No.5(171)，p.74，1972。
- 20) 植下協：3. 各国の土質分類法，土質工学会，土と基礎，Vol.20, No.12(178)，pp.93-96，1972。

- 21) 土壌物理研究会編：土の物理学，森北出版(株)，pp.29-30，1979.
- 22) 松尾新一郎，河野伊一郎：地下水位低下工法，鹿島出版会，p.132,1982.
- 23) 渡辺隆：新潟地震におけるパイプロフローテーションの効果，土と基礎，Vol.13, No.2, pp.27-33, 1965.
- 24) 藤森謙一，内田襄：新しい軟弱地盤処理工法，近代図書株式会社，p.271, 1982.
- 25) 土質工学会：地盤改良の調査・設計から施工まで，p.48, 1978.
- 26) 農林省農地局：土地改良事業計画設計基準，第3部，フィルダム，1966.
- 27) 土質工学会編：土と基礎実用数式・図表の解説，p.381, 1977.
- 28) KENJI ISHIHARA, SUSUMU YASUDA and HIDEO NAGASE: SOIL CHARACTERISTICS AND GROUND DAMAGE, *Japanese Geotechnical Society, SPECIAL ISSUE OF SOILS AND FOUNDATIONS*, pp.109-118, 1996.
- 29) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説改訂版(上巻)，pp.204, 1989.
- 30) 諏訪靖二，福田光治，濱田晃之：兵庫県南部地震による埋立地の液状化と地盤条件，日本材料学会第2地盤改良シンポジウム，pp.119-124, 1996.

(1996.9.26受付)

ANALYSIS OF "METHOD OF CLASSIFICATION OF SOILS" BASED ON PROPOSED "DIAMETER ESTIMATING GRAIN-SIZE DISTRIBUTION"

Mitsuharu FUKUDA and Takao UNO

The "diameter of estimating grain-size distribution" is defined/proposed based on grain number-based distribution. This proposed "diameter" is found out a very valid index for method of classification of soils, from considerations/analysis of the relationships of the "diameter" of each classified soils and values of CBR, angle of shear resistance, coefficient of permeability and so on. The "diameter" of the grain size distribution of accumulated strata, of appropriate soils for construction works, and of easily liquified soils, are calculated and presented for its utility.