

個数による粒度分布を考慮した
間隙指標の提案とその応用

学位論文：博士(工学)甲82号

1998年1月

福 田 光 治

目次

第1章 序論	1
1.1 研究目的と研究方法	1
1.1.1 研究目的	1
1.1.2 土質分類法の問題点と間隙指標の提案	1
1.1.3 研究方法	3
1.2 既往の研究	4
1.2.1 本研究の流れと既往の研究	4
1.2.2 力学モデルにおける粒度分布の役割	4
1.2.3 間隙指標の基礎となる粒度分布	6
1.2.4 粒度試験方法の精度	6
1.2.5 日本統一土質分類法の変遷と間隙指標による分類の意義	7
1.3 本研究の構成内容	10
第2章 粒度分布の表現方法と 力学特性の関係に関する基礎的研究	17
2.1 はじめに	17
2.2 質量基準粒度分布と個数基準粒度分布の関係	19
2.2.1 基礎式の誘導	19
2.2.2 Hazenの有効径と個数による平均径	26
2.3 間隙状態の表現方法と検証	28
2.4 透水係数の推定と粒度分布	34
2.4.1 透水係数と間隙径モデル	34
2.4.2 透水係数の推定式の比較について	35
2.4.3 不飽和土の透水係数	39
2.5 内部摩擦角 ϕ' と粒度分布	42
2.5.1 既往の提案式の検討	42
2.5.2 間隙径モデルと内部摩擦角 ϕ'	44
2.6 最大・最小間隙比と粒度分布	48
2.6.1 既往の研究	48
2.6.2 間隙径モデルと最大・最小間隙比	49
2.6.3 実験データによる検証	54
2.7 むすび	59
第3章 日本統一土質分類法の構造と粒度評価径法の研究	65
3.1 はじめに	65
3.2 粒度評価径法と土質分類	67

3.2.1	粒度特性を示す粒度評価径の定義	67
3.2.2	粒度評価径法と粒度分布	68
3.2.3	粒度評価径法によるCBR特性の分類	71
3.3	日本統一土質分類法と力学特性の分析	77
3.3.1	粒度評価径法による日本統一土質分類法の構造	77
3.3.2	日本統一土質分類法と力学特性	81
3.4	粒度調整法と粒度評価径法	84
3.5	施工法選定と粒度評価径	92
3.6	むすび	94
第4章	粗粒土分類方法の拡張と中間土分類の研究	97
4.1	はじめに	97
4.2	組成区分点と粒度評価径	98
4.3	粘性土の透水係数と粒度分布	102
4.3.1	粘性土の粒度分布と透水係数の推定	102
4.3.2	粘性土の圧密試験結果と粒度から推定した透水係数	103
4.3.3	Taylorの式と提案式の比較	108
4.4	群指数の役割と粒度評価径	111
4.4.1	群指数の定義	111
4.4.2	群指数と粒度評価径	112
4.5	むすび	116
第5章	粒度評価径法の適用性に関する研究	118
5.1	はじめに	118
5.2	諸戸らの強度推定式と 粒度評価径法による提案式の比較	119
5.2.1	諸戸らの強度推定式	119
5.2.2	強度推定式の比較	121
5.3	土質の深度方向不均一性の粒度評価径法による表現	123
5.3.1	粒度から推定した透水係数の利用	123
5.3.2	粒度評価径と大阪層群の力学特性	125
5.4	液状化判定方法と粒度分布	129
5.4.1	粒度分布に基づく既往の液状化判定方法	129
5.4.2	液状化判定法と粒度評価径	130
5.4.3	液状化強度と粒度	133
5.5	堆積環境と粒度評価径法	136
5.5.1	堆積環境の分類	136
5.5.2	大阪湾岸の粘性土と釜山の粘性土特性の比較	137

5.5.3 礫質材の力学特性	153
5.5.4 名古屋熱田砂層の力学特性	158
5.6 CBR特性の力学的評価方法	162
5.7 むすび	164
第6章 結論	169
謝辞	173

第1章 序論

1.1 研究目的と研究方法

1.1.1 研究目的

本論文は、球形モデルと土の粒度分布を基礎に幾何学的な間隙指標を提案し、その指標の物理的意味、土の力学的特性の中の透水係数や内部摩擦角 ϕ' との相関等に関する基礎的研究成果を示している。次に質量基準粒度分布から誘導される「粒度評価径」を提案し、これが連続的な分類指標として土質分類に有効であり、日本統一土質分類法に対応された工学的特性等とも整合性があることを示したものである。

土の分類法は土質工学分野でも非常に重要な役割を有しているが、後章で示すように多岐に渡る土質特性の分類には必ずしも成功していない。このためにいくつかの分類基準が併用されたりしている。また既存の分類法から力学モデルを想定することは困難であり、定量的な研究による既存分類法の見直しの必要性が認められる。特に初心者が複雑な土質特性を把握しようとする場合、定量的な力学モデルを想定できる分類法が必要と考えられる。このために本研究では既存の土質分類法に扱われず、基本的な力学モデルの誘導を基礎的課題にしてスタートさせ、そこから得られた間隙指標を用いて力学的関係を調べ、それらの裏づけによって定量的な分類法を提案するという研究方法を選択した。その研究過程で日本統一土質分類法等種々の分類法や基準との比較を行い、間隙指標である「粒度評価径」が分類指標となり得るか否かを調べる。

1.1.2 土質分類法の問題点と間隙指標の提案

土の分類法には連続的な指標を用いる方法とグループ名を用いる方法の2つの大きな潮流があり、本研究で提案する間隙指標は連続指標に対応するが、わが国では土の一般的な分類法として後者が用いられている。しかし、この分類法の適用にあたっては土質特性の差異性について充分点検しておく必要がある。例えば、砂と粘土を比べると明らかにその特性が異なり、差異は明確に存在することはわかるが、区分線をどのような根拠で行なうかが問題にあげられる。分類という定義から考えると「差異性」と「同一性」が統一できるグループ分けができるかということを考えなければならない。土を砂と粘土を含むひとつの材料として対象にする場合、これまでの経験では土の挙動は連続的である。このため不連続的な意味を持つグループ分けでは連続性を含むことができない。

粉体工学¹⁾も固体粒子と液相，気相から構成される分散系の力学であり，粒度や粘性等の基礎的特性や粒子群の力学的特性を扱っている面では土質力学と共通性を有している分野である。しかし，この分野では土質力学に対応するようなグループ分けに基づく分類法は提案されていない。この分野では，代表的な粒径やエネルギー的な因子と運動形態が関連づけられており，土質の力学挙動区分方法とは異なった方法が模索されている。分散系の粒子力学をグループ分けによって分類することは特殊な例と考えられる。

一方，古くから分類学が一つの学問分野を確立している生物では分類の基準が確立されており，「生物における種と種との間には，たとえそれが互いに近縁のものであっても，種の形態に明確な相違があり，種の区別を妨げるような性状の連続性は無視できる」²⁾というLinn'eの形態種が今日的基盤になっている。そして「基本概念において，種は自然界に生息している生物に与えられた分類階級の基本単位で，人工的につくりだされた生物に与えられはならないこと，ならびに種の特徴となる性質は，生殖または細胞増殖の過程で，その遺伝的連続性を保持すべき・・・」³⁾としている。この定義では分類方法が有していなければならない特徴として，明確な「差異性」と「同一性」及び「貫徹性」を基準要素として含むことを示している。貫徹性は遺伝性や連続性を指している。生物学で確立された分類法と比べると，統一土質分類法は分類間の「同一性」と「差異性」があいまいで，レベル分けの役割が希薄と考えられる。

以上の考えからすれば，グループ分けによる土質分類は現象のランク，区分が不明であるため非常にあいまいな分類法であるといわざるを得ない。初学者，未経験者にとって，グループ分けによる不連続的，段階的な土質分類の手法は土粒子分散系の挙動を無理に固定化して分類してしまうので，あるいは「木を見て森を見ない」概念になる可能性がある。このため，本研究では，間隙指標である「粒度評価径」を土の分類に使用すると，その値を基礎に透水係数や内部摩擦角 ϕ' ，また土の間隙径等が推定できることを示し，間隙指標を用いて力学モデルのイメージを育むことを試みている。その特徴は分類基準として一つの連続変量である「粒度評価径」を選択して，シンプル化をめざした点である。このような連続変量を土質分類に適用したものは，既存分類法ではAASHTO³⁾の群指数がある。この方法は群指数という一種の連続量を土の挙動のレベルに対応させるものである。この手法には土粒子の分散系の挙動の連続的変化が期待されているが，わが国での活用例は少なく，その活用性を今後も研究する必要がある。Terzaghi⁴⁾も研究者，実務者の科学的・工学的認識を深めるためには，以下のように「当を得た数値」によって補足する必要があることを示している。

「In order to distinguish between the individual members of each group and the different states of each member, two different procedures can be used. Either the principal groups can be supplemented by numerical values representing the pertinent index properties.」

「Every engineer should develop the habit of expressing his opinion on the plasticity and grain-size characteristics of the soils he encounters by numerical values rather than adjectives」

1.1.3 研究方法

土質力学は大きさ、形状、鉱物等多様な粒子を骨格とし、その周りを液体・気体などが取り囲む集合体を対象とする力学である。従って土の力学の基本的な特徴は骨格を構成する粒度特性によって決まってくる。土質分類法ではこの特徴を示すために細粒分含有率や様々な粒径が用いられてきた。ところが、土質分野で一般的に用いられている粒度分布は「質量基準の粒度分布」であり、幾何学的な粒径の割合とは異なっている。土の力学特性は粒子の質量ではなく、幾何学的な粒径等に依存しているため、「容積あるいは個数基準の粒度分布」を基礎に力学的モデルを構築することが必要である。同じような考え方は粉体工学やコンクリート工学でも示され、後者では絶対容積含有率⁵⁾による粒度分布が用いられている。

本研究では「個数基準粒度分布」から得られる平均径を用いて平均間隙径や平均水膜厚さを誘導し、これらを間隙径指標とすることを旨とする。しかし、土質分野では「質量基準粒度分布」が一般的であるため、粒度分布の対数正規分布性を仮定して「質量基準粒度分布」から「個数基準粒度分布」を求める方法を研究する。即ち、この分野の研究が進んでいる粒体工学⁶⁾や堆積学の分散特性に関する研究成果⁷⁾を参考にして2つの粒度分布の関係づけを行うことにする。

間隙径指標と力学的特性を関係づける研究で用いる基礎的概念は間隙径あるいは水膜厚と、粒子間の接触点特性である。後者の接触点は間隙径と粒径の比あるいは関数で表わされると仮定して、間隙指標と力学特性の関係を統計的に求める。さらに本研究で定義する平均間隙径深や平均水膜厚等の間隙指標と力学特性との関係で、「質量基準粒度分布」から直接求められる粒度評価径が重要な役割を果たしていることを明らかにする。そして、この粒度評価径を、概略的な透水係数や内部摩擦角 ϕ' の大きさが推定できる土の分類基準に利用する研究を行なう。

なお、本研究では土の分類法が対象になるので、粒度分布や堆積条件等できるだけ広範な土質のデータを使用し、一般性を追求する必要がある。しかし、個人のレベルで行う試験には限りがあるため、種々の文献から収集したデータを分析対象にしている。

1.2 既往の研究

1.2.1 本研究の流れと既往の研究

本研究過程を大きく分けると、(1)土の粒度分布の分析→(2)土のモデルとなる間隙指標の提案→(3)透水係数や内部摩擦角 ϕ' と間隙指標の相関→(4)粒度評価径法の提案と既存分類方法の構造分析、の4段階になるが、基礎から応用にいたる4段階を網羅する既存の研究はみられない。

統一土質分類法は上記4段階のうち第1, 3, 4段階を含み、本研究に対し最も総合的であり、分類名と内部摩擦角 ϕ' や透水係数等の関係^{8), 9)}が示されている。また統一分類法を日本に適用するに際して、植下ら¹⁰⁾のCBR特性と粒度分布に関する詳細な研究があり、本研究の応用面での比較基準にしている。しかし、前節で指摘したように第2段階に対応する土の力学モデルの概念があいまいである。このため連続的な土の特性を評価する上では必ずしも成功していない。

本研究の力学特性として土の透水係数と内部摩擦角 ϕ' の2つをとりあげた。これは実務的レベルで日常的に直面する力学的特性であり、土の統一土質分類法と力学的特性の関係でもこの2つがとりあげられている。このうち地下水分野では透水係数を支配する因子として幾つかの間隙指標が提案され、第1段階から第3段階までの研究が続けられている。Taylorの代表径 D_s ¹¹⁾や宇野ら¹²⁾の平均間隙径 R 等がある。また質量基準粒度分布から得られる10%粒径は有効径として利用されている。しかし、これらの研究は地下水の分野に限られ、第3段階で示した内部摩擦角 ϕ' 等の力学諸量との関係や第4段階の土の分類までは発展させられていない。

本研究で対象とする内部摩擦角 ϕ' は、諸戸¹³⁾によって最小間隙比、粒子形状や均等係数と関係させられ、またCaquot¹⁴⁾も土質を概略的に粘土、砂に区分して間隙比との関係式を提案し、第1段階から第3段階までの研究を行なっている。しかしこれらの研究で用いられた因子は必ずしも土のモデルを想像させる間隙指標としては意義づけられていない。小田ら¹⁵⁾は土の骨格構造を粒子接点角の分布特性として把握し土の構成式との関係を研究しているが、土の多様な粒度分布を対象にした研究はみられない。

こうした既往の研究成果を考慮して、本研究では土の基本的なモデルの検討から初めたが、第2段階から第3段階にいたる過程ではTaylorらの透水理論の基礎となるPoiseuilleのモデルや、小田らが用いた粒子接点の概念を利用している。

1.2.2 力学モデルにおける粒度分布の役割

本研究では土のモデルを検討するに当たって質量基準粒度分布を基礎としたが、粒

度分布は土質分類の重要な要因の一つであり、様々な代表値が土質工学の支配因子に取り入れられてきた。透水係数の推定式におけるHazenの10%粒径 d_{10} ¹⁶⁾、Creagerの20%粒径 d_{20} ¹⁷⁾の役割はその代表例である。液状化予測における50%粒径 d_{50} ¹⁸⁾もまた重要な因子になっている。

一方、土の粒度は粗粒から細粒まで幅広く含まれている。こうした土を室内試験の対象とする場合、最大粒径が限られてくるため、尖頭粒度や相似粒度によって最大粒径の粒度調整を行ない、小粒径の粒度を用いた試験結果から原粒度の特性を推定しなければならないケースによく遭遇する。この場合、調整粒度の試験結果から原粒度の特性を推定する必要があり、フィルダム関係ではWalker-Hortzの方法や細粒分含有率^{19)~21)}が用いられて補正されることがある。Pascal分布やTalbotの式における定数も風化や粒子破碎過程における粒度変化をあらわす研究や締固め度特性の研究^{22)~25)}に利用されている。注入や地下水低下工法等の施工法の選択基準では粒度分布曲線で囲まれる範囲によって示されている²⁶⁾。このように多くの分野で粒度分布に関する因子が個々に使用されているが、各々の分野を統一する力学モデルとしては発展させられていない。

土の分類法として最も体系化されたものに統一土質分類法があり、粗粒土分類に粒度組成が用いられている。従って第1段階と応用課題としての第4段階が結ばれている。この方法も土の現象の認識の深化に伴って土のモデル化を行ないながら形成されてきたものである。このため第1段階と第4段階を関係づける上で問題となる課題を検討するため土の粒度分布と分類の関係を歴史的に振り返ってみる。

1900年前後は地質学や堆積学あるいは土壌学の発展に則して土粒子や粘土などの物理化学的、鉱物学的研究が蓄積されはじめた時期である。この年代より少し前の1850年頃から土の粒度を基本にした分類法が土壌学で現われ²⁷⁾、以後粒度は分類法上重要な役割を担っていくことになる。しかし同時期に進展している粘土の研究は光学顕微鏡を用いて粒径や形状が研究対象にされ、この研究成果が蓄積されて1940年前後に粒径による粘土の分類²⁸⁾が提案されていくが普及はしていない。そして1930年から1940年にかけて細粒土の分類法として土の粒度ではなく、土の状態量としてのAtterberg限界の有効性が指摘されはじめ、各国の分類法に取り入れられていっている。その代表的な例はアメリカで示された統一土質分類法²⁹⁾である。粘土やシルト等の細粒分の分類では細粒土と粗粒土あるいは粘土やシルト、コロイド等の境界となる粒径を巡って活発な研究がなされたが、粒径だけでなく粒度組成や粒度分布などの広い意味での粒度特性の研究は砂やレキの分類に限定されていった。ところが電子顕微鏡やX線などにより粘土の粒径や形状、配向度が研究されるようになり、またミクロのレベルから土の構成式が提案されだし、あらためて土の分散性と粒度特性が考慮されなければならない時期にきていると考えられる。

わが国の土質分類は歴史的変遷はあるが統一土質分類法に基づいて実施されている。粒度分布の役割は特に粗粒土の分類で重要な役割を果たしているが、実務的な段階で、この分類法を充分活かして土の工学的特性を評価しているとは言い難い。例え

ば土に、ある分類名を与えたとしても、力学的強度や透水性等の力学的特性を定量的に推定することは困難である。しかし、例えば1995年1月17日兵庫県南部地震ではこれまでの液状化可能な粒度分布の範囲を粗粒側に越えたまさ土が液状化していることが明らかになっている^{30), 31)}。この事例は土の粒度による分類はフラクションとしての土質名を与えることではなく、より定量的にしていくことが必要になっていることを教えている。さらに粘性土の分類でも粒度分布は粘土特性に重要な影響を与えていることは明らかである。例えば塑性指数と $2\mu\text{m}$ 以下の含有量の関係（活性度）にも見られるように、制約された条件であっても粒度特性の有効性が裏付けられている^{32), 33)}と考えられる。

1.2.3 間隙指標の基礎となる粒度分布

日本統一土質分類法で採用されている分類方法には粒径区分と対応した粒度組成、粒径加積曲線の形状を特徴づける均等係数や曲率係数あるいは対称係数などが基本的因子になっている。これらの指標は定性的には非常に有効な情報を与える半面、実務的には試料間の土質特性の変化あるいは細粒分を含んだ礫質土や砂質土等の透水性の変化に追従できない特徴を有している。つまり細粒分の影響を十分に反映していない指標が使用されていると考えられる。その原因の一つに容積による粒度分布と質量による粒度分布の違いが考慮されていないことにある。力学的特性の多くは固相や液相、気相の状態や割合等の関係で決まることは自明である。そしてこれらの相互関係は幾何学的条件で決まり、これは質量ではなく容積に関係していることも明らかである。従って、土の粒度は質量よりも容積で表現する必要があるのに対し、質量表示の粒度が使用されてきたことが細粒分を含有した土への粒度による分類法の適用が十分でなかった一つの理由と考えられる。

本研究では土質力学で一般的な質量による粒度分布から個数による粒度分布の誘導方法を示す。また、個数による粒度分布の有効性を示すために、幾何学的な大きさが主要な要因になると考えられる土の水理特性や内部摩擦角 ϕ' を対象に、この分野で用いられている概念を再検討し、新たな関係式を導く。両分類の相互関係の研究に当たっては簡単化のため粒度分布に対数正規分布を仮定している。質量による粒度分布から粒径による粒度分布の誘導の研究は粉体工学でも実施されている³⁴⁾。これらの分野でも粒径の対数正規分布性が重要な基礎概念になっているので、本研究でもこの仮定に立脚した展開を図った。

1.2.4 粒度試験方法の精度

土の粒度分布は土の力学モデルの基本骨格をつくるものであるため、粒度試験は土の物理特性を調べる上で基本になっている。従って本研究でも、粒度分布の分析を

間隙指標を誘導する基礎としたが、様々な土を対象にした時、土の粒度試験結果は形状や扁平度あるいは試験方法などにより異なってくるのが指摘されている。特に土の粒度特性で土の性質の差異をあらわそうとした1940年頃、試験条件により粘土の粒径が様々な変化することが明らかにされ、粒度を分類に使用する制約が示されたことはその代表的な例である³⁵⁾。

表-1.2.1 細粒土の粒度試験方法

試験方法名	試験方法	問題点
沈降分析	Stokesの法則を利用 比重浮標を使用	Stokesの法則により間接的に粒径、 密度が求められる。懸濁液の条件 によって変化
ピペット法	所定の時間・所定の深さの懸 濁液をピペットを用いて採取 し乾燥質量を測定	比重浮標法に比し、熟練が必要
沈降天秤法	懸濁液中に据えた天秤に堆積す る土粒子の累積質量を測定	粒径評価がStokesの法則を介し ている。従って懸濁液の条件 によって変化
光透過法	懸濁液に照射して、透過した光の 強度から土粒子の粒度分布を推定	分析が高価
顕微鏡法	粒径を直接測定	分析に長時間を要す

表-1.2.1は現状の粒度試験方法と問題点を整理したものである。現在も超音波など新しい分散方法が取り入れられ研究が続けられているが、根本的な解決はみていない。このため、本研究では実務段階ではフルイや沈降法による粒度試験が基本になっていることを考慮し、この方法を前提にした。

本研究では粗粒土で得られた知見を粘性土まで拡張する試みを行う。確かにルーティンで実施されている粒度分布は、上記文献にも示されるように光透過法や顕微鏡法等に比べると大きく異なる可能性もある。この場合定量的な取扱は困難になるが、例えば液性限界と土質分野で一般的な沈降法を基礎に求めた粒度の関係を調べると、何らかの関係が見い出されるように、必ずしも完全に否定することもできない。このため本研究では透水係数を指標として粘性土への拡張の可能性も調べる。

1.2.5 日本統一土質分類法の変遷と間隙指標による分類の意義

本研究で提案する粒度評価径法の応用分野は土の力学モデルと土の分類を関係づける第3段階と第4段階に関係する。土の分類で最も体系化されたものは統一土質分類法である。このため本研究ではまず日本統一土質分類法と粒度評価径法の関係を研

究する。

日本の統一土質分類法は1970年頃から植下ら^{10), 36)}を中心に基礎的研究が開始され1973年に土質工学会「土の判別分類法基準化委会」で「日本統一土質分類法」としてまとめられたのが最初である³⁷⁾。これは地盤工学会「土質試験の方法と解説(1990)」^{38), 39)}に収録されている。その後1990年に多少の簡略化を目的として改訂⁴⁰⁾された。1996年には過去約3年間の基礎的研究を経て「日本統一分類法」として再改訂された⁴¹⁾。このポイントは地盤工学が対象とする材料の種類や範囲が急速に広がり、このため広範囲な地盤材料を抱括的に分類できるように新しい分類体系が示されたことにある。さらに大分類、中分類、小分類と分類の過程が整理されるとともに命名法の整理が実施されている。しかし基本的な方法は統一土質分類法の枠組みをはずれるものではない。分類の対象となる土は生物系の樹枝状の進化過程を示す対象とは異なり、同一性、差異性がいまいな物質である。このため学問の進展に伴って運動レベルのトレースができるようになってくると、この区分名を基礎とする分類法ではより詳細な区分けに向かっていくことは避けられない。

これらの動きを確認するため分類名、特に1996年の分類段階でいえば小分類に相当する最大分割での分類名数の変遷を示したのが表-1.2.2である。

表-1.2.2 統一土質分類における分類名の数

	1969年 ³⁹⁾ 試案	第1回 ⁴⁰⁾ 1973	改訂 ³⁸⁾ 1990	新しい ⁴¹⁾ 提案 1996	ASTM ³⁸⁾
砂礫系等 粗粒土	12	24	20	18	8
粘土等の 細粒土	9	11	11	14	7
合計	21	35	31	32	15

ASTMを基調とする1969年試案³⁹⁾を除けば、時代的には変化は少ないが、同一系統の統一土質分類法であるASTM15ケに比べると日本統一土質分類法の数が多い。これは土質工学の発展に伴って緻密化していく傾向があることを反映したものと考えられる。また、1996年度の改訂³⁷⁾では均等係数と曲率係数を用いた分類方法が姿を消した。文章中では特徴分けに使用するということは示されているが、基本的な方法からははずされた。この土質分類の流れは、ある面では土質力学の対象とする挙動に

おける同一性，差異性が決められず，挙動レベルあるいは連続的な分類対象として把握する方が適応していることを示していると考えられる。

1.3 本研究の構成内容

本研究で対象とした項目を示したのが図-1.3.1である。土の粒度分布と力学に関する従来の研究は質量基準粒度分布の列に示されているように、

- A)組成と日本統一土質分類法
- B)粗粒分含有率，細粒分含有率と強度
- C) d_{10} , d_{20} と透水係数
- D) d_{50} , 細粒分含有率と液状化判定
- E) Walker - Hertzの混合理論と密度特性
- F) 土質分類と土質変化率の関係
- G) d_{15} , d_{85} とフィルター

等が中心になっている。本研究の目的は統一されることなく使用されている上記の様々な因子を粒度評価径によって簡単化することを狙ったものであるから、間隙指標である粒度評価径の分類における有効性を確立するため上記A)～G)に示された特性を研究対象にする。

本研究は質量基準粒度分布を基礎にして個数基準の粒度分布の代表値を求め、これらの値を用いて幾何学的粒径をイメージしながら間隙指標を提案する。この間隙指標におけるモデルと実験結果をもとに飽和透水係数との関係で物理的意義を確認する。さらに統計的に有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' との関係式を求める。この2つの関係から粒度評価径という分類指標を抽出する。また最大・最小間隙比における間隙径モデルの役割を分析し、モデルの有効性を示す。そして粒度評価径を分類指標とするために、日本統一土質分類法の裏付けになったCBR特性の研究を介して、日本統一土質分類法の構造的な内容が粒度評価径に基づく分類方法に含まれていることを示す。また、粒度評価径は連続量であるという特徴を活かして、日本統一土質分類から独立して定義されている「中間土」の位置づけ、及びこの基本となる組成区分の特徴を粒度評価径座標上で分析する。またもう一方の土質分類の基礎になっているAASHTOの群指数の関係をとりあげ、連続的分類方法の意義を確認するため、両者の類似性と適用範囲を吟味する。最後に応用的な課題として粒度調整法、施工法の選定、他の推定式との比較、堆積環境の分類、礫質土の力学的特性、液状化粒度等を取りあげて粒度評価径法の意義を確認する。以上の研究によって、質量基準粒度分布で示された土質工学上の課題A～Gの関係が、粒度評価径による分類方法によって、統一的に評価できることを示す。

図-1.3.2は本論文の構成と内容をまとめたものであり、論文の各章の内容を以下に示した。

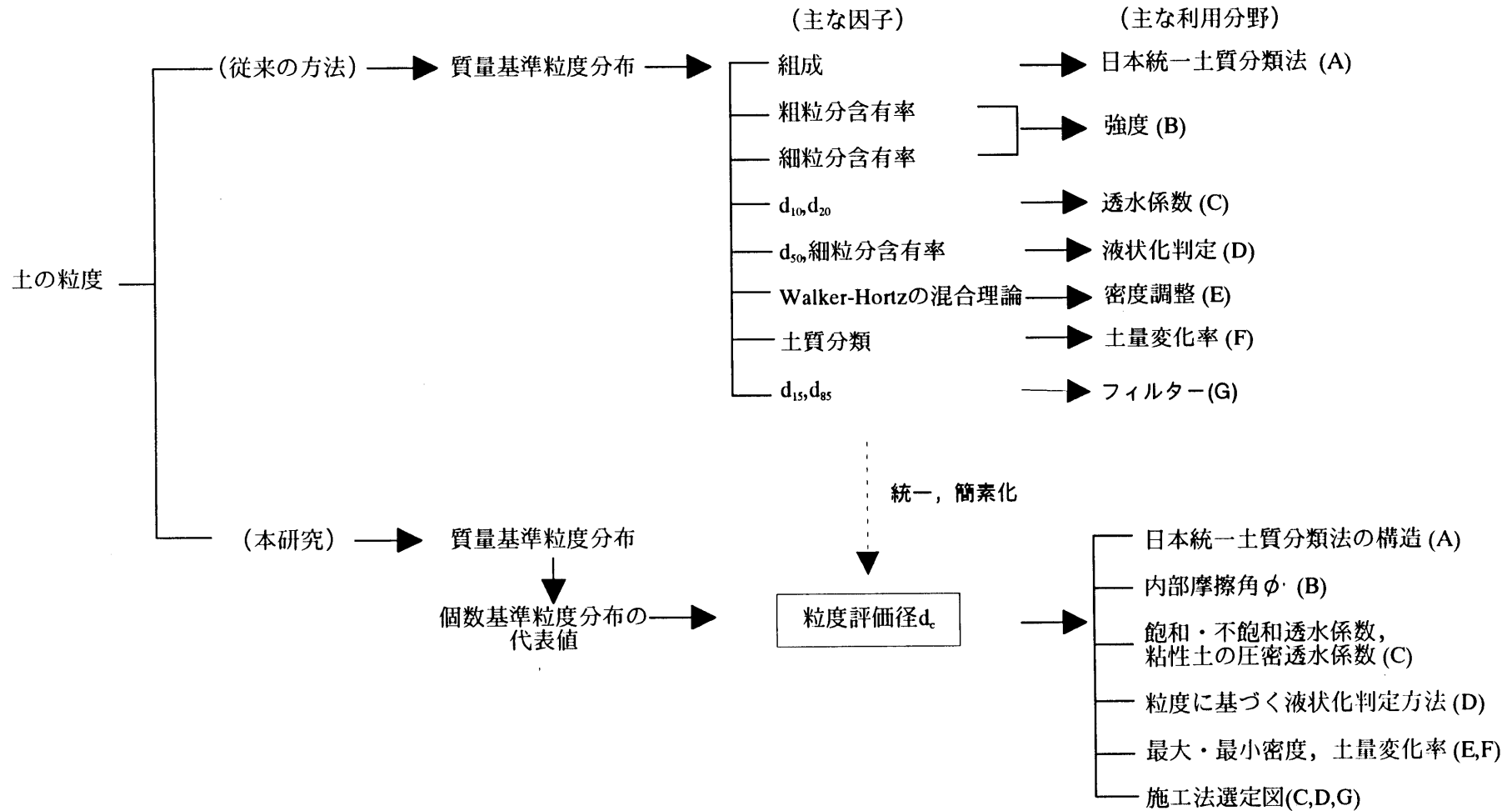


図-1.3.1 土の粒度の利用と研究対象

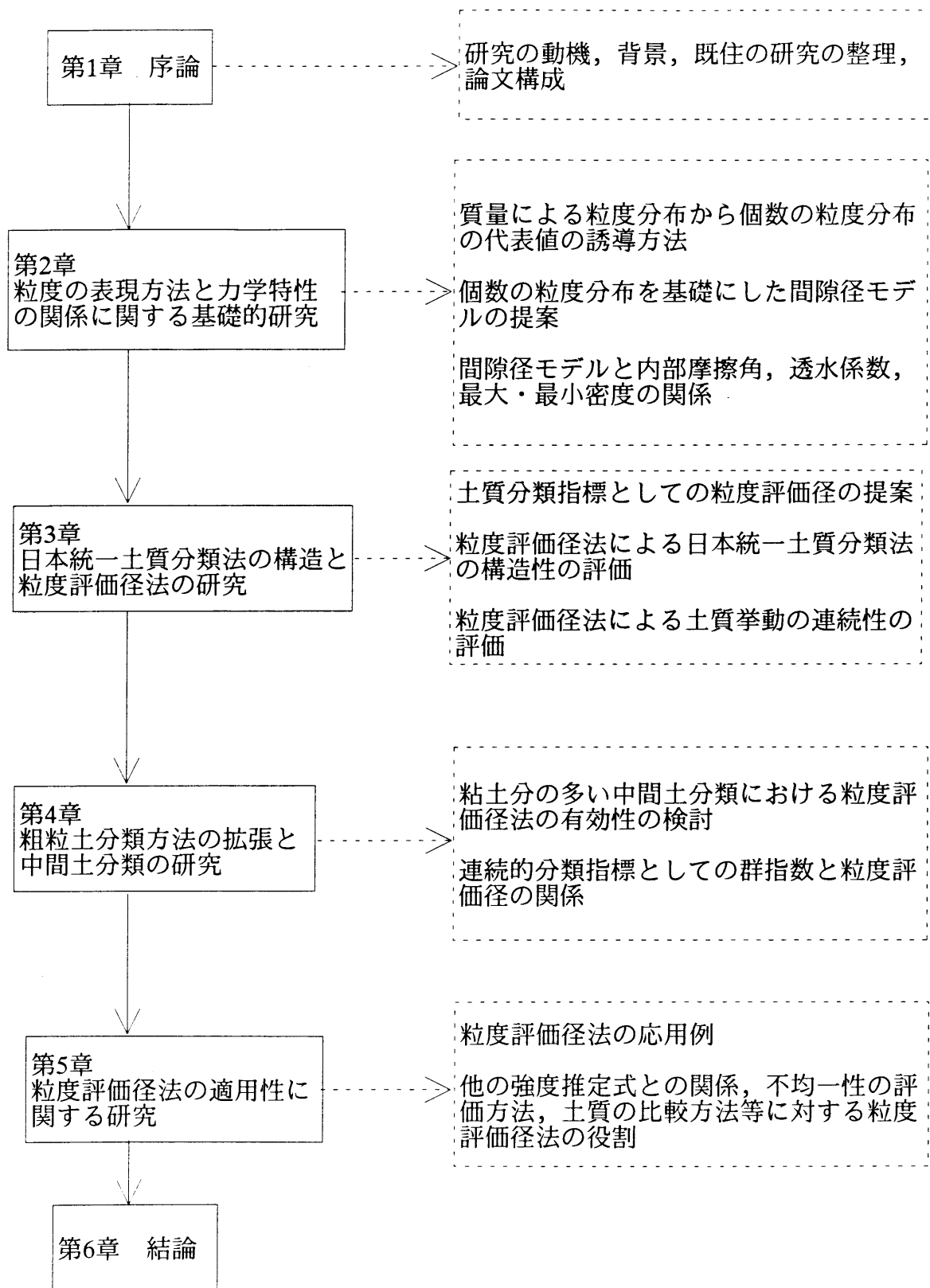


図-1.3.2 本論文の構成と内容

「第1章 序論」では土質分類の背景、課題を中心に示した。特に日本統一土質分類法の歴史的課題を振り返り、問題点、課題を抽出した。その中で、グループによる分類法よりも連続量的な分類法が望まれていることを強調し、本研究の主たるテーマであることを示した。

「第2章 粒度分布の表現方法と力学特性の関係に関する基礎的研究」では土質分類法の基礎となる間隙径モデルの提案と、力学的関係を示している。ここでは質量基準と個数基準の粒度分布に対数正規分布性が適用されると仮定することによって、土質分野で一般に用いられている質量基準粒度分布から個数基準粒度分布の代表値を理論と実験によって求める方法を展開する。この検証として土質力学で示されている「有効径」との関係を検討した。さらに球形モデルという概念を利用して平均的な間隙径深、平均的な水膜厚さを提案し、宇野らの実験結果によりその物理的精確を確認する。間隙径モデルの物理性を確認した後、粒度評価径法の基礎的背景を構成する実験式となる透水係数、内部摩擦角 ϕ' と間隙径モデルの関係式を導く。また、本研究では強度式の妥当性を追求する過程で、諸戸らの強度提案式との比較を行なったが、この中で必要になる最大、最小間隙比と間隙径モデルの関係も調べる。

「第3章 日本統一土質分類法の構造と粒度評価径法の研究」では、第2章で透水係数や内部摩擦角 ϕ' との関係式が導きだされることを分析し、粒度分布から誘導される粒度評価径を用いた分類法を提案する。この方法の中広い応用と有効性を確認するために、日本統一土質分類法の構造と歴史性を検討する。またこの結論として、粒度調整法の分析や施工法の選択における粒度分布と工法選択図を提案する。

「第4章 粗粒土分類方法の拡張と中間土分類の研究」では、粗粒土をモデル化して誘導された粒度評価径法を、中間土や粘性土の分類にも形式的に拡張できることを示す。このため土質工学の分野で中間土として示されている材料特性の裏づけを粒度評価径で行なう。このテーマでは、特に粒度組成区分点と粘性土の圧密透水係数を対象に研究する。そして各国の粒度組成区分点の類似性と相異性を示し、それが粒度評価径～細粒分含有率の関係で特徴づけられることを明かにして、粒度評価径の変化特性から抽出した区分点を提案する。粒度評価径法を中間土や粘性土に拡張する時、透水係数と粒度特性の関係は重要な意義を持つ。このため粒度分布が滑らかに変化する場合は、粒度評価径法によって正規圧密状態の粘性土の圧密透水係数が比較的高い精度で推定できることを示す。粒度評価径法によって中間土や粘性土の力学的特性を推定できることを明かにした後、粒度評価径法は、細粒土の分類に有効とされる連続的数値としての分類指数である群指数と関係があることを示す。

「第5章 粒度評価径法の適用性の関する研究」では、堆積条件の評価方法、不均一な土質分布の表現方法、粒度評価径法による液状化判定方法、大阪湾と釜山の沖積粘性土の分類と粒度評価径の役割、礫質土の土量変化率と内部摩擦角 ϕ' の試験精度の評価と粒度調整、名古屋に堆積している熱田砂層の力学的特性、及びCBRの支持力式による評価等について触れ、粒度評価径法による土質分類の有効性を示す。

「第6章 結論」は本研究で得られた研究成果と今後の研究課題について整理した。

参考文献

- 1) 粉体工学の基礎編集委員会編：粉体工学の基礎，日刊工業新聞社，pp.1-11，1992.
- 2) 長谷川武治編著：改訂版微生物の分類と固定<上>，学会出版センター，pp.3-5，1984.
- 3) ASTM：D3282-83，pp.532-589，1983.
- 4) K. Terzaghi, R. Peck：Soil Mechanics in Engineering Practice，John Willey & Sons，pp.37-39，1970.
- 5) 土木学会：コンクリートライブラリー76「高炉スラグ骨材コンクリート施工指針」，p.15，1993
- 6) 粉体工学の基礎編集委員会編：粉体工学の基礎，日刊工業新聞社，pp.31-46，1992.
- 7) 庄司力偉：堆積学，朝倉書店，pp.178-224，1979.
- 8) 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.
- 9) A. W. Bishop, L. Bjerrum：The Relevance of the Triaxial Test to the Solution of Stability Problems，Proc. ASCE Research Conf. on Shear Strength of Cohesive Soils，pp.451-501，1960. (赤井浩一：土質力学，朝倉書店，pp.22-23，1996.)
- 10) 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3部第194号，pp.103-112，1971.
- 11) Taylor D. W.：Fundamentals of Soil Mechanics，John Wiley & Sons，pp.97-123，1948.
- 12) 宇野尚雄，杉井俊夫，神谷浩二：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察，土木学会論文集，No.469/III-23，pp.25-34，1993.
- 13) 諸戸靖史： $\bar{k}-e_{\min}$ 図による砂礫の工学的分類，土質工学会第11回土質工学研究会講演概要集，pp.291-294，1976.
- 14) Albert Cagoue, Jean Kerisel (藤田亀太郎，最上武雄監訳)：カコー，ケリーゼルの土質力学，技報堂，p.174，1975.
- 15) 小田匡寛，風間秀彦，榎本明：砂質地盤の異方性について(1)，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.121-124，1976.
- 16) 宇野尚雄：透水係数を推定する実験公式について，土木学会中部支部昭和49年研究発表会講演概要集，pp.115-116，1974.
- 17) 横沢昭人：土質調査の実際，理工図書，p.17，1973.
- 18) 安田進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，pp.77-81，1995.
- 19) 末岡徹，後藤聡，茗ヶ原義彦，小川輝繁：粗粒材—細粒材の混合割合が締固特性に与える影響について，土質工学会「粗粒材料の現場締固めの評価に関するシンポジウム」発表論文集，pp.33-36，1990.
- 20) 李弘揆：礫質土の締固め特性とその強度に関する研究，名古屋大学博士学位申

- 請論文, pp.141-142, 1995.
- 21) 宇梶文雄：フィルダ技術ノート—材料の基本と実際—, 日刊工業新聞社, p.51, 1980.
 - 22) 福本武明：まさ土の粒径分布に関する一考察, 土質工学会第22回土質工学研究会講演概要集, pp.165-166, 1986.
 - 23) 福本武明：粒子破碎機構に関する考察, 土質工学会第24回土質工学研究発表会講演概要集, pp.259-260, 1989.
 - 24) 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, 土質工学会第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.287-288, 1990.
 - 25) 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, 京都大学博士学位申請論文, pp.303-330, 1957.
 - 26) 渡辺陸：新潟地震におけるバイプロフローテーションの効果, 土質工学会「土と基礎」, Vol.13, No.2, pp-27-33, 1965.
 - 27) 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.79, 1972.
 - 28) アーカー・ラリオノク（松尾新一郎訳）：土質工学・地質学アプローチ, 土の構造, 山海堂, pp.21-31, 1972.
 - 29) 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.
 - 30) K. Ishihara, S. Yasuda & H. Nagase : Soil Characteristics and Ground Damage, Japanese Geotechnical Society, Special Issue of Soils and Foundations, pp.109-118, 1996.
 - 31) 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回地盤改良シンポジウム, pp.119-124, 1996.
 - 32) A. W. Skempton : The Colloidal “Activity of Clays” , Proc.3rd, ICSM, Vol.1, pp.57-61, 1953.
 - 33) 井上陸夫, 中島伸一, 濱田晃之, 諏訪靖二, 福田光治：埋立地における土質工学的特性の整理方法例, 土質工学会第29回土質工学研究発表会講演概要集, pp.253-254, 1994.
 - 34) 川北公夫, 小林真純, 種谷真一：粉体工学（基礎編）, 槇書店, pp.39-52, 1974.
 - 35) 土質工学会編：土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp.54-64, 1979
 - 36) 植下協：2.わが国の土質分類法基準案確立までの経緯, 土質工学会「土と基礎」, Vol.20, No11 (177), pp.78-83, 1972.
 - 37) 地盤工学会：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」工学的地盤分類法, pp.1-2, 1995.
 - 38) 土質工学会編：土質試験の方法と解説, 土質工学会, pp.186-199, 1990.
 - 39) 土質工学会編：土質試験法—第1回改訂版—, 土質工学会, pp.621-643, 1971.

- 40) 三木五三郎，齊藤孝次：最上武雄監修，土木工学基礎叢書1「土の工学的分類とその利用」，鹿島出版会，pp.107-120，1979.
- 41) 地盤工学会：改正地盤工学会基準・同解説-地盤材料の工学的分類方法（日本統一分類法），p.10，1996.

第2章 粒度分布の表現方法と力学特性の 関係に関する基礎的研究

2.1 はじめに

土質分野でも土の粒度分布は対数正規分布で近似的に示されることが箭内ら¹⁾により指摘されている。また堆積学の分野でも Φ -Scaleによる対数正規分布性をもとに堆積条件などの研究が進められている²⁾。しかし土質分野では一般的に均等係数と曲率係数及び質量基準粒度分布上の10, 20, 50%粒径等が用いられているが、これらの統計的背景は十分には明らかにされていない。岩井ら³⁾は土の粒径加積曲線の表示方法の研究の中で、Hazenが初めて対数確率紙を粒径加積曲線の表示に用いたこと、Grassbergerが粒径加積曲線に統計的考察を加えた最初の研究者としてあげ、散布度、歪度等を統計的に考察している。陶野⁴⁾は均等係数 U_c 、対称度 U_c' を分散度や分級度、偏平度などの堆積学分野で用いられている統計的諸概念と関連づける研究を行い、堆積環境と土質特性の関係を示している。

本研究では質量による粒度分布から個数による粒度分布の代表値を誘導するにあたって、陶野と同じ手法を用いて、実験データに依拠して基本になる分散特性の確認を行った。そして、これらの結果をベースにし、また標準偏差の同一性の仮定を加えて両者の関係を求めている。

図-2.1.1に第2章の構成を示す。

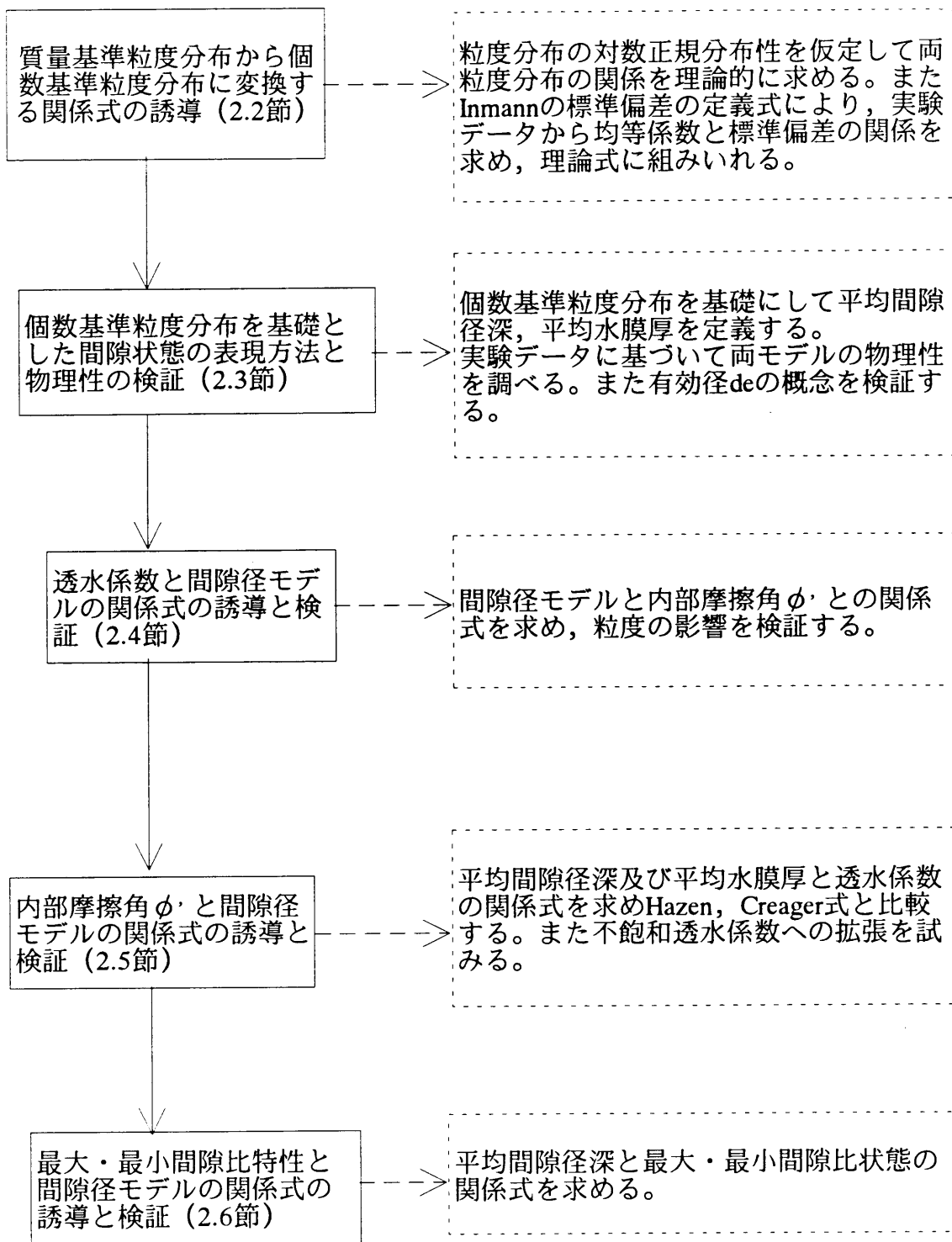
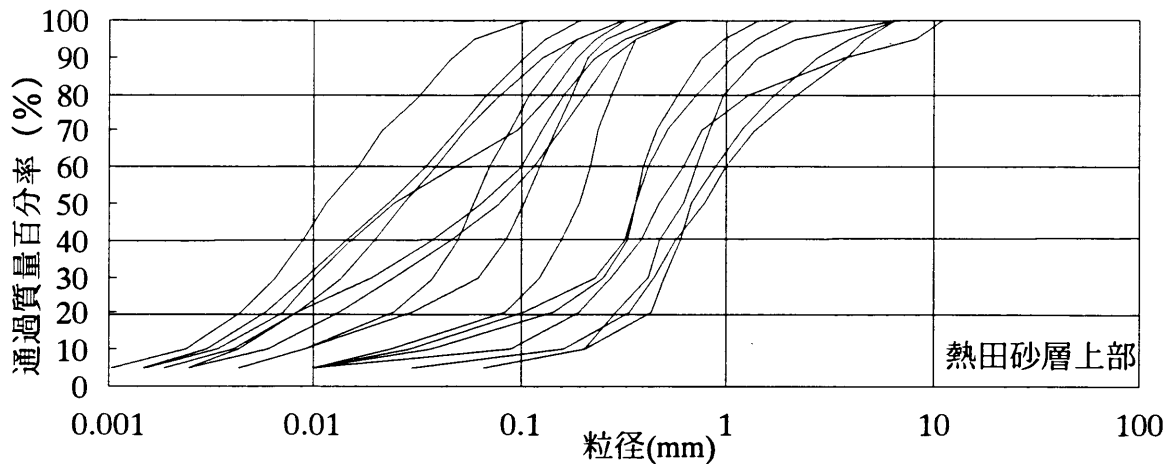


図-2.1.1 本章の構成

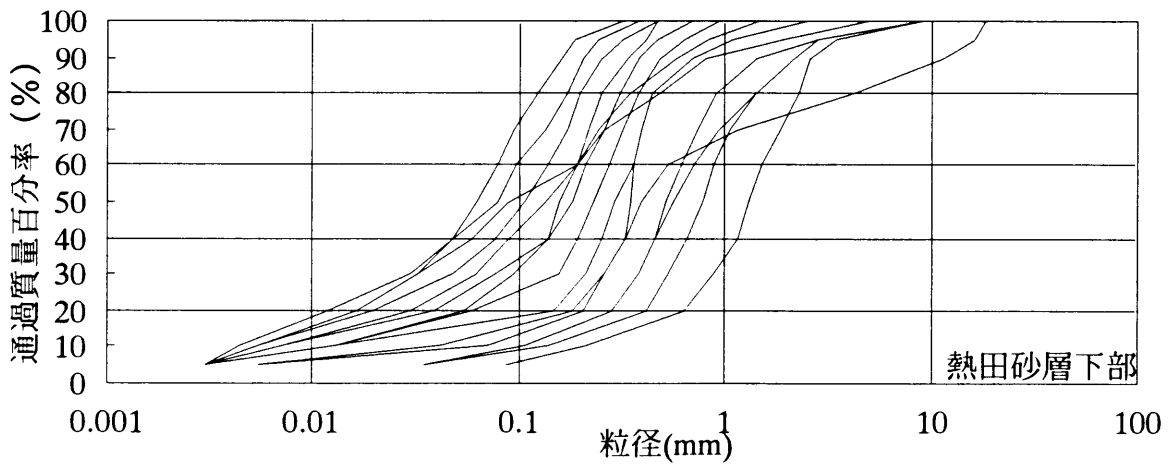
2.2 質量基準粒度分布と個数基準粒度分布の関係

2.2.1 基礎式の誘導

図-2.2.1は名古屋では建築基礎の支持地盤としてよく利用されているPleistoceneの熱田砂の質量基準粒度分布を示し、それを対数確率紙上に例示したのが図-2.2.2である⁵⁾。



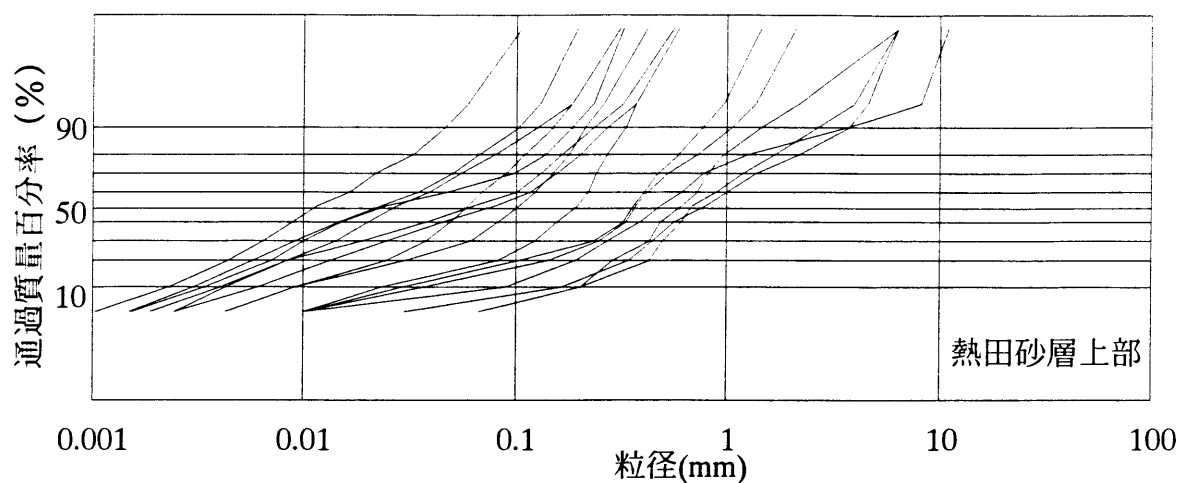
(a) 熱田砂層上部



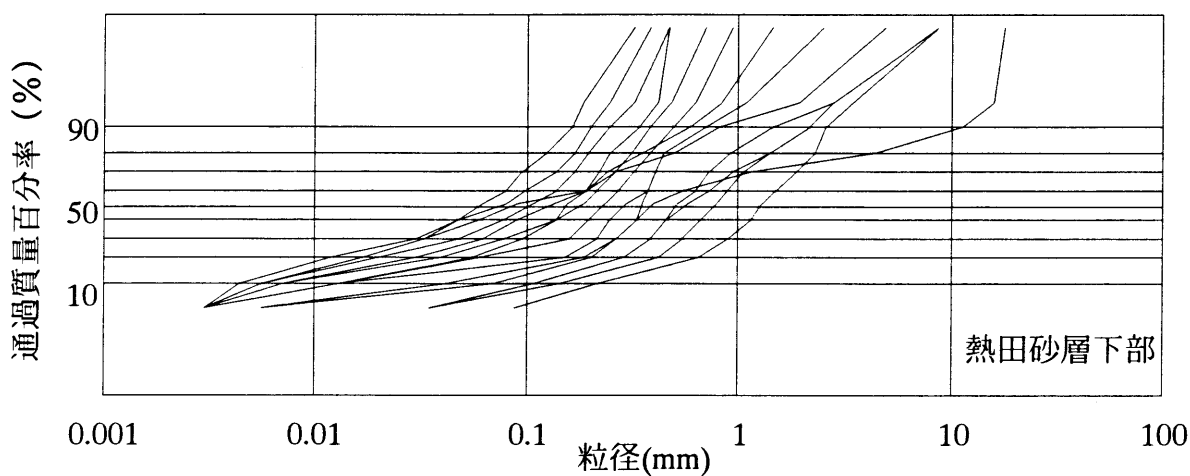
(b) 熱田砂層下部

図-2.2.1 熱田砂層の質量基準粒度分布

これらの図は箭内らの指摘と同様、両端部を除けば対数正規分布で表現できることを示している。一方、堆積学では対数の底を2とする Φ -Scaleをもとに、式(2.2.1)、(2.2.2)の確率密度関数をベースにして分散状態を示す種々の因子が式(2.2.3)~(2.2.5)



(a)熱田砂層上部



(b)熱田砂層下部

図-2.2.2 熱田砂層の対数正規分布性

のように提案されている。

$$\phi = \log_2 d \quad (2.2.1)$$

$$f(\phi) = \frac{1}{\sigma_\phi \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\phi - \phi_{50}}{\sigma_\phi} \right)^2 \right\} \quad (2.2.2)$$

ここにd: 粒径(mm), σ_ϕ : 標準偏差, ϕ_{50} : 確率50%粒径に対する ϕ を示す。
式(2.2.3)はInmannが提案した定義式⁶⁾である。

$$\text{分級度} \quad \sigma_1 = \frac{1}{2} (\phi_{84} - \phi_{16}) \quad (2.2.3)$$

対称度
$$\alpha_{\phi} = \frac{\phi_{50} - \sigma_{\phi}}{\sigma_{\phi}} \quad (2.2.4)$$

偏平度
$$\beta_{\phi} = \frac{\frac{1}{2}(\phi_{95} - \phi_5) - \sigma_{\phi}}{\sigma_{\phi}} \quad (2.2.5)$$

陶野らは土の続成作用や堆積環境による強度などの違いを研究する中で、式(2.2.3)~(2.2.5)の諸概念を検討し、均等係数 U_c と σ_{ϕ} の関係が強いこと、しかし曲率係数 U_c' と α_{ϕ} 、 β_{ϕ} 等との関係は見当たらないこと等を指摘している。

図-2.2.3~5は広い範囲の粒度を対象にするため文献⁷⁾等からデータを収集し、均等係数 U_c 、曲率係数 U_c' と σ_{ϕ} 、 α_{ϕ} の関係を求めたものである。用いたデータはまさ土、崖錐堆積物、火山灰等を含む広範な材料で、礫質土から砂質土までである。データに使用した材料の粒度分布の広がりには1~1000の間にばらついている均等係数にも反映されている。

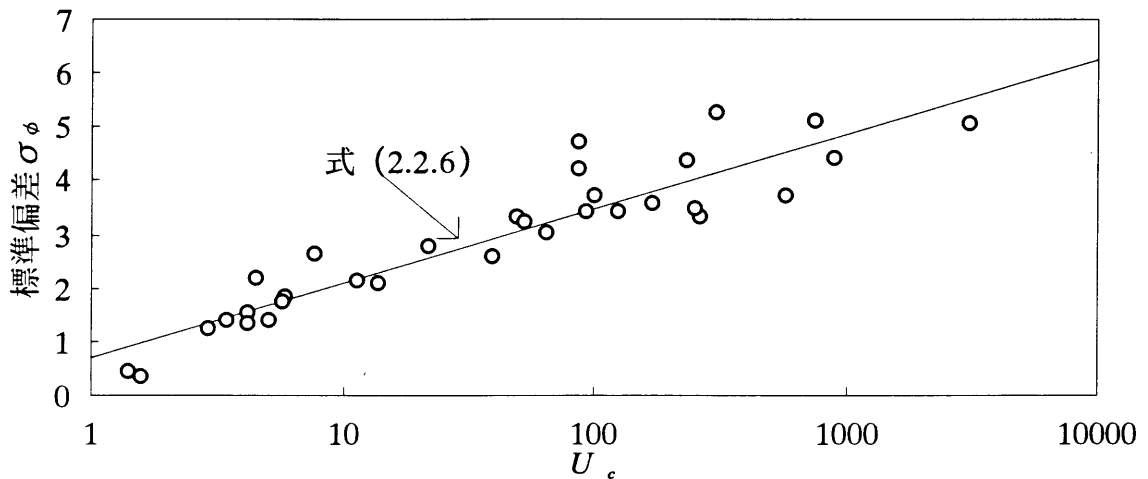


図-2.2.3 均等係数と分級度

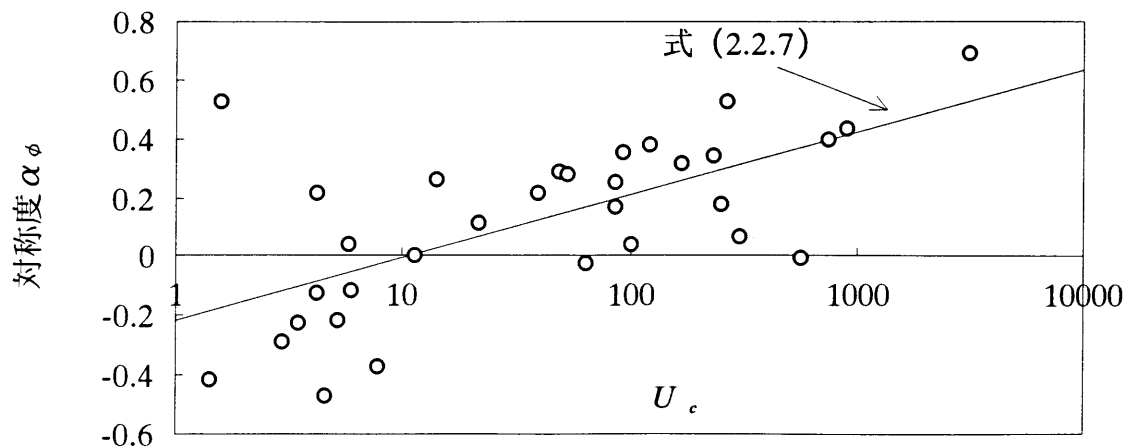


図-2.2.4 均等係数と対称度の関係

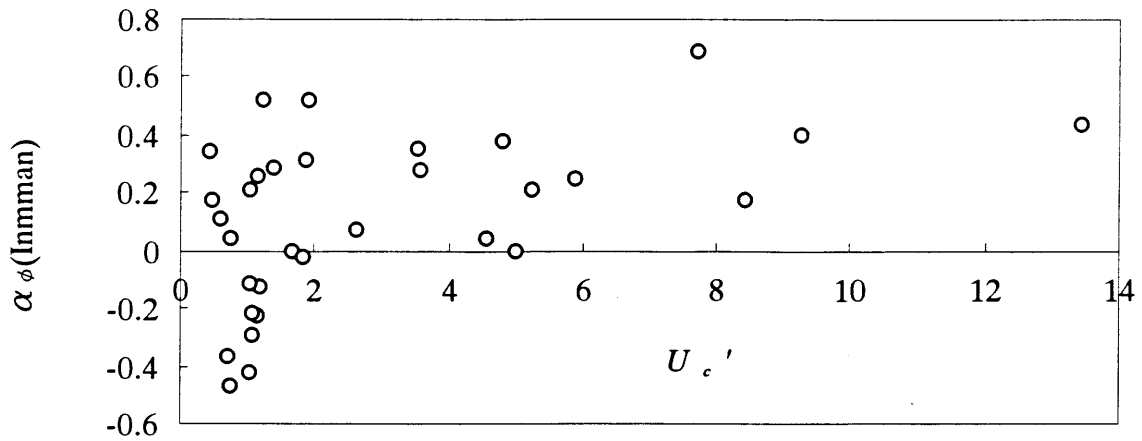


図-2.2.5 曲率係数と対称度

これらの図によっても曲率係数 U_c' と統計諸量の関係は見られないが、均等係数 U_c との関係が強いという陶野らと同じ結論を得ることができる。最小二乗法でこれらの関係を求めたのが式(2.2.6), (2.2.7)で、各々相関係数は $r=0.92, 0.65$ である。

なお、本論文では専用対数を \log で、自然対数は \ln で表示している。

$$\sigma_\phi = 0.699 + 1.395 \log U_c \quad (2.2.6)$$

$$\alpha_\phi = -0.216 + 0.212 \log U_c \quad (2.2.7)$$

式より均等係数 U_c は単に分散を示すだけではなく、対称度にも関係した概念であることが分かった。しかし、反面、曲率係数 U_c' は片寄り度を表わす概念とされ、対称度に関係することが期待されたが、図-2.2.5に示されているように、ほとんど相関がなく統計的な裏付けの乏しい概念といえる。

以下に粒径加積曲線の対数正規分布性を仮定し、質量基準粒度分布特性と個数基準粒度分布特性との関係を誘導するが、この過程では式(2.2.6)を標準偏差を示す基本式として用いている。質量基準の粒度分布と個数基準の粒度分布を関係づけるにあたって両者の粒度分布を式(2.2.8), (2.2.9)のように仮定する。

質量基準確率密度関数

$$f(\ell nd) = \frac{1}{\ln \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_w}{\ln \sigma_w} \right)^2 \right\} \quad (2.2.8)$$

個数基準確率密度関数

$$g(\ell nd) = \frac{1}{\ell n \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\} \quad (2.2.9)$$

ここに、 d ：粒径， d_w ：質量基準粒度分布の平均粒径， d_g ：個数基準粒度分布の平均粒径， σ_w ：質量基準粒度分布の標準偏差， σ_g ：個数基準粒度分布の標準偏差である。また，個々の粒子の重さは粒径 d の d^m に比例すると仮定し，その比例定数を α とする。一般に土は様々な鉱物からなり，また異なった粒径，形状で構成されているので，比例定数は必ずしも一定値ではない。しかし，近似的に α は土粒子の密度のように平均的な値が仮定できるとすれば，式(2.2.8)，(2.2.9)から式(2.2.10)を得る。

$$\frac{1}{\ell n \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_w}{\ell n \sigma_w} \right)^2 \right\} = \frac{\alpha d^m \frac{1}{\ell n \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\}}{\int_{-\infty}^{\infty} \alpha d^m \frac{1}{\ell n \sigma_g \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ell nd)} \quad (2.2.10)$$

ここで， α ， σ_g は一定と仮定しているので，式(2.2.10)になる。

$$\frac{1}{\ell n \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_w}{\ell n \sigma_w} \right)^2 \right\} = \frac{d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\}}{\int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ell nd)} \quad (2.2.11)$$

式(2.2.11)の右辺分母を， $\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} = t$ として展開する。

$$d(\ell nd) = \ell n \sigma_g \cdot d t \quad (2.2.12)$$

$$d = \exp(t \cdot \ell n \sigma_g + \ell nd_g) \quad (2.2.13)$$

$$d^m = \exp(m \cdot t \cdot \ell n \sigma_g + m \cdot \ell nd_g) \quad (2.2.14)$$

式(2.2.12)，(2.2.14)を式(2.2.11)の右辺分母に代入すると式(2.2.15)が得られる。

$$\begin{aligned}
& \int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ell nd) \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} \exp(m \cdot t \cdot \ell n \sigma_g + m \cdot \ell nd_g) \cdot \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) \cdot (\ell n \sigma_g) dt \\
&= d_g^m \cdot \ell n \sigma_g \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2} + m \cdot t \cdot \ell n \sigma_g\right) dt \\
&= d_g^m \cdot \ell n \sigma_g \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (t - m \cdot \ell n \sigma_g)^2 + \frac{1}{2} m^2 (\ell n \sigma_g)^2 \right\} dt \\
&= d_g^m \cdot \ell n \sigma_g \cdot \exp \left\{ \frac{1}{2} m^2 (\ell n \sigma_g)^2 \right\} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (t - m \cdot \ell n \sigma_g)^2 \right\} dt \\
&= d_g^m \cdot \ell n \sigma_g \cdot \exp \frac{(m \cdot \ell n \sigma_g)^2}{2} \cdot \sqrt{2\pi} \tag{2.2.15}
\end{aligned}$$

上記の誘導結果を新ためて示すと、式(2.2.16)になる。

$$\int_{-\infty}^{\infty} d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\} d(\ell nd) = d_g^m \ell n \sigma_g \exp \left\{ \frac{(m \cdot \ell n \sigma_g)^2}{2} \right\} \sqrt{2\pi} \tag{2.2.16}$$

式(2.2.16)を式(2.2.11)にいて展開し、整理すると式(2.2.17)になる。

$$\frac{1}{\ell n \sigma_w \sqrt{2\pi}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - d_w}{\ell n \sigma_w} \right)^2 \right\} = \frac{d^m \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 \right\}}{d_g^m \cdot \ell n \sigma_g \cdot \exp \left\{ \frac{1}{2} (m \cdot \ell n \sigma_g)^2 \right\} \sqrt{2\pi}} \tag{2.2.17}$$

両辺の対数をとると式(2.2.18)になる。

$$-\frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_w}{\ell n \sigma_w} \right)^2 - \ln(\ell n \sigma_w) = m \cdot \ell nd - \frac{1}{2} \left(\frac{\ell nd - \ell nd_g}{\ell n \sigma_g} \right)^2 - m \cdot \ell nd_g - \ln(\ell n \sigma_g) - \frac{1}{2} (m \cdot \ell n \sigma_g)^2 \tag{2.2.18}$$

ℓnd について整理すると、式(2.2.19)が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\ln^2 \sigma_w} - \frac{1}{\ln^2 \sigma_g} \right) \cdot \ln^2 d + \left(\frac{\ln d_g}{\ln^2 \sigma_g} + m - \frac{\ln d_w}{\ln^2 \sigma_w} \right) \ln d + \frac{\ln^2 d_w}{2 \cdot \ln^2 \sigma_w} \\ & - \frac{\ln^2 d_g}{2 \cdot \ln^2 \sigma_g} + \ln(\ln \sigma_w) - m \cdot \ln d_g - \frac{1}{2} m^2 \cdot \ln^2 \sigma_g - \ln(\ln \sigma_g) = 0 \end{aligned} \quad (2.2.19)$$

式(2.2.19)において、下に示す式(2.2.20)～(2.2.22)の3式が同時に成立すれば、式(2.2.19)は粒径 d の如何にかかわらず常に成立することを意味する。

$$\frac{1}{\ln^2 \sigma_w} - \frac{1}{\ln^2 \sigma_g} = 0 \quad (2.2.20)$$

$$\frac{\ln d_g}{\ln^2 \sigma_g} + m - \frac{\ln d_w}{\ln^2 \sigma_w} = 0 \quad (2.2.21)$$

$$\frac{\ln^2 d_w}{2 \cdot \ln^2 \sigma_w} - \frac{\ln^2 d_g}{2 \cdot \ln^2 \sigma_g} + \ln(\ln \sigma_w) - m \cdot \ln d_g - \frac{1}{2} m^2 \cdot \ln^2 \sigma_g - \ln(\ln \sigma_g) = 0 \quad (2.2.22)$$

式(2.2.20)より式(2.2.23)が得られるので、これを式(2.2.21)に代入すると式(2.2.24)を得る。

$$\sigma_g = \sigma_w \quad (2.2.23)$$

$$\ln d_g = \ln d_w - m \cdot \ln^2 \sigma_w \quad (2.2.24)$$

そして、式(2.2.23)、(2.2.24)を式(2.2.22)の左辺に代入すると満足されるため、結果としては質量基準粒度分布と個数基準粒度分布を結ぶ式(2.2.11)が成立するためには式(2.2.23)、(2.2.24)の2式が成立すればよい。

式(2.2.24)の m は形状依存の因子であるが、本研究では球形モデルを想定して $m=3$ とした。この場合、式(2.2.25)を得る。

$$\ln d_g = \ln d_w - 3 \cdot \ln^2 \sigma_w \quad (2.2.25)$$

式(2.2.25)を常用対数で書き直し、式(2.2.23)を代入すると、式(2.2.26)になる。

$$\log d_w = \log d_g + 6.908 \cdot \log^2 \sigma_g \quad (2.2.26)$$

式(2.2.26)は粉体工学でHatch⁸⁾が見いだした式と同一で、対数正規分布性を仮定した場合の統計的関係を示している。

2.2.2 Hazenの有効径と個数による平均径

Hazenの有効径 d_e は平均間隙径に対応した大きさとして透水係数の推定等に使用されてきたが、質量基準粒径加積曲線上では、この有効径は10%粒径に対応するとされている。本節では式(2.2.8)に示す質量基準粒度分布の確率密度関数の関係から求められる10%粒径と、個数基準粒度分布から得られる平均粒径の関係を統計的に検討してみる。10%粒径 d_{10} は質量分布から求められる値であるため、ここでは、式(2.2.27)を満足する粒径として10%粒径 d_{10} と定義する。

$$F(\ell nd) = \int_{-\infty}^{\ell nd} f(\ell nd) d(\ell nd) = 0.1 \quad (2.2.27)$$

$f(\ell nd)$ は式(2.2.8)で示されている。式(2.2.27)を満たす粒径 d は正規確率表を利用すると式(2.2.28)になる。

$$\frac{\ell nd_{10} - \ell nd_w}{\ell n\sigma_w} = -1.28 \quad (2.2.28)$$

式(2.2.24), (2.2.28)より、式(2.2.29)が得られる。

$$\ell nd_g - \ell nd_{10} = (1.28 - m \cdot \ell n\sigma_w) \cdot \ell n\sigma_w \quad (2.2.29)$$

これを常用対数で整理すると、式(2.2.30)になる。

$$\log d_g - \log d_{10} = (1.28 - 2.303 \cdot \ell \log \sigma_w) \cdot \ell \log \sigma_w \quad (2.2.30)$$

式(2.2.30)は個数基準粒度分布の平均径と、質量基準粒度分布の10%粒径 d_{10} との関係である。仮定より $m=3$ である。また、式(2.2.6)の標準偏差 σ_ϕ は2を底とする対数座標上の標準偏差であるため自然対数スケールの σ_w に変換する必要がある。そこで、式(2.2.6)を用いて式(2.2.31)とすると式(2.2.32)を得る。

$$\sigma_\phi = \frac{\ell \log \sigma_w}{\ell \log 2} = 0.699 + 1.395 \ell \log U \quad (2.2.31)$$

$$\ell n \sigma_w = 0.484 + 0.420 \ell \log U_c \quad (2.2.32)$$

式(2.2.30), (2.2.32)より個数基準粒度分布の平均粒径 d_g とHazenの有効径 d_{10} の関係を求めたのが図-2.2.6と表-2.2.1である。図-2.2.6より個数基準平均粒径 d_g は、均等係数 U_c が1~2で粒径が揃っている場合は、10%粒径と類似した大きさであるが、均等係数が大きくなれば、両方の比は小さくなり両者は対応しなくなる。つまり、均等係数 U_c が大きくなると10%粒径 d_{10} と平均粒径 d_g との差が大きくなるため、有効径を幾何学的な粒度分布の平均粒径とする意味が曖昧になることがわかる。

表-2.2.1 d_{10} と d_g の比較

U_c	1	2	3	4	5	10
d_g/d_{10}	0.92	0.45	0.23	0.13	0.08	0.01

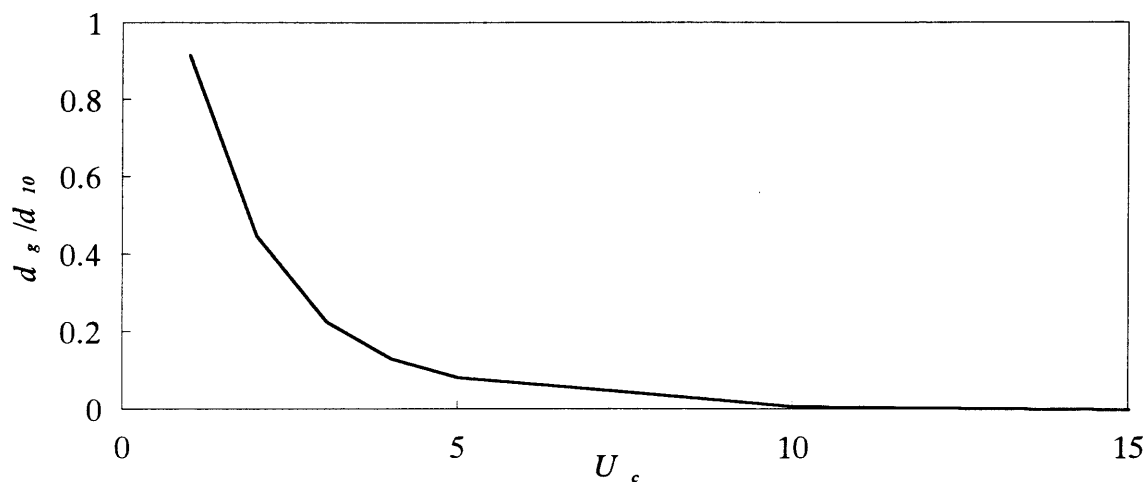


図-2.2.6 Hazenの有効径と個数基準粒度分布上の平均径

2.3 間隙状態の表現方法と検証

保水や透水などの浸透・浸潤現象を土の構造から検討していく場合、平均間隙径や間隙分布、比表面積などの概念は土の挙動を理解する上で有効な役割を果たしている。本研究では質量基準粒度分布から個数基準粒径分布の関係を求めたが、この方法をさらに拡張して物理的な意味を与えるため、間隙の長さ、あるいは水膜の厚さなどに対応する概念を検討した。

平均粒径の表面積を S 、個数を N 、全体積を V 、土粒子の実質部分の体積を V_s 、間隙の体積を V_v とすると単位表面積当りの平均間隙の厚さ h は、形状係数 Φ_v 、 Φ_s を介して式(2.3.1)から得られる。なお、 h は水理学上の径深に対応しているので平均間隙径深と今後呼ぶ。

$$h = \frac{V_v}{NS} = e \times \frac{V_s}{NS} = e \times \frac{\sum n_i \phi_{vi} d_i^3}{\sum n_i \phi_{si} d_i^2} \quad (2.3.1)$$

従ってこの定義から平均間隙径に相当する厚さは見掛け上 $2h$ となる。また式(2.3.1)では平均間隙径深 h は土粒子実質部分の体積を表面積で除した項と間隙比の積となっ

ている。そこで式(2.3.1)の右辺 $\frac{\sum n_i \phi_{vi} d_i^3}{\sum n_i \phi_{si} d_i^2}$ について検討する。この場合形状係数 ϕ_{vi} 、 ϕ_{si} は Φ_v 、 Φ_s で一定と仮定すると、式(2.3.2)になる。

$$\frac{\sum n_i \phi_{vi} d_i^3}{\sum n_i \phi_{si} d_i^2} = \frac{\sum n_i d_i^3}{\sum n_i d_i^2} \times \frac{\phi_v}{\phi_s} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d^3 g(\ell nd) d(\ell nd)}{\int_{-\infty}^{\infty} d^2 g(\ell nd) d(\ell nd)} \times \frac{\phi_v}{\phi_s} \quad (2.3.2)$$

右辺の項は式(2.2.16)を用いると式(2.3.3)になる。

$$\frac{\sum n_i \phi_{vi} d_i^3}{\sum n_i \phi_{si} d_i^2} = \frac{d_g^3 \exp(4.5 \ell n^2 \sigma_g)}{d_g^2 \exp(2 \ell n^2 \sigma_g)} \times \frac{\phi_v}{\phi_s} = d \exp(2.5 \ell n^2 \sigma_g) \times \frac{\phi_v}{\phi_s} = \exp(\ell n d_g + 2.5 \ell n^2 \sigma_g) \times \frac{\phi_v}{\phi_s} \quad (2.3.3)$$

そして式(2.2.23)、式(2.2.25)を式(2.3.3)に代入し、式(2.3.1)を整理すると、式(2.3.4)を得る。

$$h = \frac{\phi_v}{\phi_s} \times e \times \exp(\ell n d_w - 0.5 \ell n^2 \sigma_w) \quad (2.3.4)$$

粉体工学では式(2.3.4)中の Φ_v/Φ_s の値として $6\sim 11^n$ を与えている。また同様に見掛け上の平均水膜厚さを b 、水の体積を V_w として、保水条件を無視するならば、式(2.3.5)を得る。

$$\begin{aligned}
 b &= \frac{W_w}{NS} = \frac{1}{\gamma_w} \times \frac{W_w}{W_s} \times \frac{W_s}{NS} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \times w \times \frac{V}{NS} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \times w \times (1+e) \times \frac{V_s}{NS} \\
 &= \frac{G_s}{\gamma_w} \times w \times \frac{\sum n \Phi_v d^3}{\sum n \Phi_s d^2} = \frac{G_s}{\gamma_w} \times \frac{\Phi_v}{\Phi_s} \times w \times \exp(\ell n d_w - 0.5 \ell n^2 \sigma_w)
 \end{aligned}
 \tag{2.3.5}$$

また式(2.3.4)、式(2.3.5)より、式(2.3.6)が導かれる。

$$\frac{b}{h} = \frac{\frac{\Phi_v}{\Phi_s} \times \frac{G_s}{\gamma_w} \times w \times \exp(\ell n d_w - 0.5 \ell n^2 \sigma_w)}{\frac{\Phi_v}{\Phi_s} e \times \exp(\ell n d_w - 0.5 \ell n^2 \sigma_w)} = \frac{w \times G_s}{\gamma_w \times e} = S_r \tag{2.3.6}$$

ここに、 S_r は飽和度である。そこで、式(2.3.4)、式(2.3.5)が一般にどの程度の値を示すのかを試算したのが表-2.3.1である。なお、ここでは係数項の値として $\Phi_v/\Phi_s \doteq 0.1$ 、 $G_s \times \Phi_v/\Phi_s \doteq 0.3$ として計算した。また d_w の値には近似的に $d_w \doteq d_{50}$ を用い、式(2.3.7)、(2.3.8)、及び式(2.2.32)を基礎式とした。

$$h = \frac{0.3 d_{50}}{\exp\{0.5 \ell n^2 \sigma_w\}} \cdot \frac{e}{G_s} \tag{2.3.7}$$

$$b = \frac{0.3 d_{50}}{\exp\{0.5 \ell n^2 \sigma_w\}} \cdot w \tag{2.3.8}$$

妹尾¹⁰⁾によると、水膜の厚さからpFを理論的に求める際、

pF8に相当する水膜厚さ	3.0×10^{-8} cm
pF5.5 //	1.0×10^{-4} cm

を仮定している。またSchofield¹¹⁾らによると水膜厚さとして $20 \mu\text{m} \sim 220 \mu\text{m}$ が計算されているが、表-2.3.1に示す(A)、(B)の計算結果はこれらの平均水膜厚さと同程度のオーダーの値を与えている。

次に、平均間隙径深 h によって平均間隙径を $2h$ として式(2.2.30)と同様Hazenの有効径 d_{10} と比較してみる。式(2.2.28)、式(2.3.4)より整理すると、式(2.3.9)を得る。

$$\frac{2h}{d_{10}} = \frac{e}{5} \exp \{ (1.28 - 0.5 \ln \sigma_w) \ln \sigma_w \} \quad (2.3.9)$$

表-2.3.1 含水比と平均水膜厚さ

(A) 50%粒径 $d_{50}=0.342\text{mm}$ 均等係数 $U_c=1.45$

含水比 w	平均水膜厚 b (mm)	間隙比 e	平均間隙径深 h (mm)
0.1	9.58×10^{-3}	0.6	1.67×10^{-2}
0.2	1.92×10^{-2}	0.8	2.22×10^{-2}
0.3	2.87×10^{-2}	1.0	2.79×10^{-2}

(B) 50%粒径 $d_{50}=1.27\text{mm}$ 均等係数 $U_c=11.7$

含水比 w	平均間隙厚 b (mm)	間隙比 e	平均間隙径深 h (mm)
0.1	1.85×10^{-3}	0.6	2.41×10^{-2}
0.2	3.70×10^{-3}	0.8	3.21×10^{-2}
0.3	5.55×10^{-3}	1.0	4.02×10^{-2}
0.4	7.40×10^{-3}	1.2	4.82×10^{-2}

そこで間隙比 e の範囲を0.6~2.0, 均等係数 U_c の範囲を1~20として試算した結果が表-2.3.2である。

表-2.3.2 $\frac{2h}{d_{10}}$ の変化

$e \backslash U_c$	1	2	3	4	5	10	15	20
0.6	0.20	0.24	0.26	0.27	0.27	0.27	0.26	0.24
0.8	0.26	0.32	0.34	0.35	0.36	0.36	0.34	0.33
1.0	0.33	0.40	0.43	0.44	0.45	0.45	0.43	0.41
1.5	0.50	0.60	0.64	0.67	0.68	0.67	0.64	0.61
2.0	0.66	0.80	0.86	0.89	0.90	0.89	0.86	0.82

表より, 10%粒径 d_{10} に比べ $2h$ は小さな値を示しているが, オーダーとしてはほぼ同程度である。式(2.2.30)では粒度分布の平均径と比べて均等係数が3以上になると $d_g/d_{10} \leq 0.2$ になり, 両者の差が大きくなるのに対し, $2h/d_{10}$ の比は表の条件の範囲では $0.9 \geq 2h/d_{10} \geq 0.2$ となる。このことは有効径 d_{10} の意味は平均粒径よりも平均間隙厚と関係があることを示している。また間隙比が砂の値0.6位であれば, 有効径は平均間

隙径よりも大きいですが、間隙比 e が大きくなれば、有効径と $2h$ は同じ程度になることがわかる。

以上の検討結果より、平均間隙径深 h は土の平均的な間隙径に対応した関係になることが推定された。そこで、この関係をさらに明確にするため、図-2.3.1に示す粒度分布をもつ標準砂、ガラスビーズ、長良川シルトを用いて空気透過法による比表面積測定から求めた平均間隙径と平均間隙径深 h を比較した。

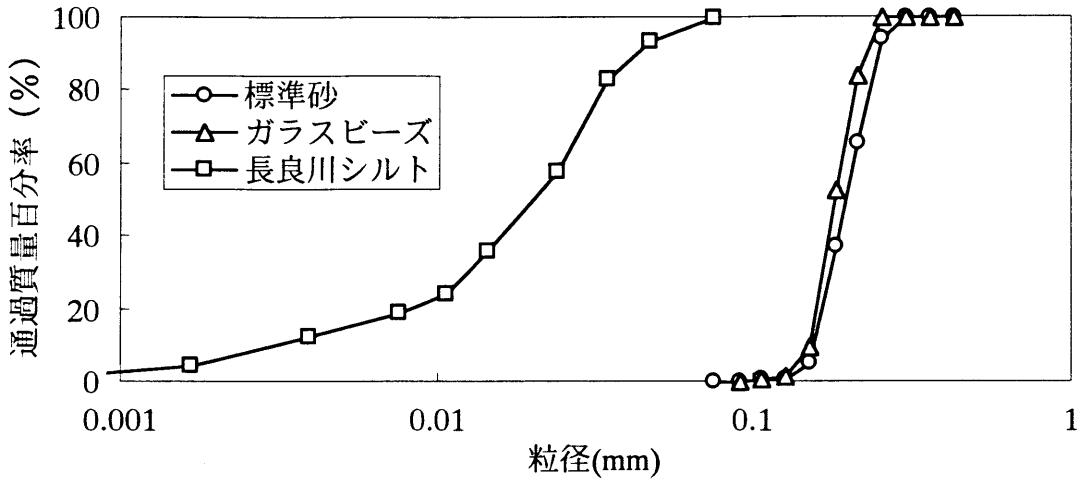


図-2.3.1 空気透過法による比表面積測定に用いた土試料の粒度

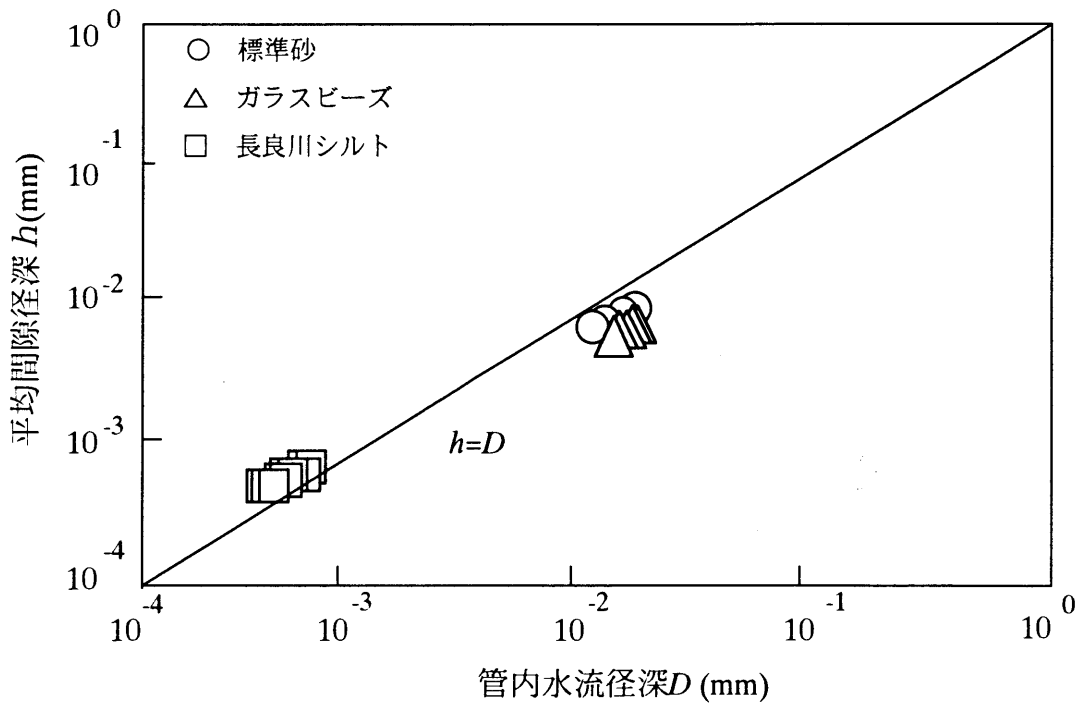


図-2.3.2 平均間隙径深 h と管内水流径深 D の比較

用いたデータは宇野ら¹²⁾の試験結果である。宇野らは毛管モデルを用いて間隙径 R と粒度の関係を求めているが、ここでは平均間隙径深 h と直接対比できるように式(2.3.10)に示される管内水流の径深 D を用いた。

$$D = \frac{\pi R^2 / 4}{2\pi R / 2} = \frac{R}{4} \quad (2.3.10)$$

図-2.3.2は実験した全データを対比したもので、その中から各々4個の結果を示したのが表-2.3.3~2.3.5である。式(2.3.7)による推定値は実験で得られた管内水流径深 D に対し、 $10^{-4} \sim 10^{-2}$ mmの範囲において $h/D=0.6 \sim 1.2$ の関係がみられ、平均間隙径深 h は式(2.3.10)に示す管内水流径深 D に対応していることが明らかである。また表に示されるように3種の実験結果では、両者の比は均等係数が1.25(ガラスビーズ)のとき約0.6で最小値になり、標準砂、長良川シルトと均等係数が大きくなれば、 h/D も大きくなっていく傾向がみられる。この傾向については今後の研究課題にすることとして、本研究では概略的には $h \doteq D$ を仮定する。この前提にたてば粒度分布から式(2.3.7)を使って毛管モデルの管内水流径深が容易に推定できることになる。

表-2.3.3 標準砂の間隙径
50%粒径 $d_{50}=0.195$ mm 均等係数 $U_c=1.33$
土粒子の密度 $\rho_s=2.645$ (g/cm³)

間隙比 e	平均間隙径深 h (mm)	毛管径深 D (mm)	h/D
0.849	0.01562	0.02262	0.69
0.763	0.01404	0.01950	0.72
0.685	0.01260	0.01681	0.75
0.604	0.01110	0.01420	0.78

表-2.3.4 ガラスビーズの間隙径
 50%粒径 $d_{50}=0.178\text{mm}$ 均等係数 $U_e=1.25$
 土粒子の密度 $\rho_s=2.498(\text{g}/\text{cm}^3)$

間隙比 e	平均間隙径 深 h (mm)	毛管径深 D (mm)	h/D
0.699	0.01267	0.02274	0.56
0.665	0.01205	0.02060	0.58
0.614	0.01109	0.01877	0.59
0.572	0.01035	0.01727	0.62

表-2.3.5 長良川シルトの間隙径
 50%粒径 $d_{50}=0.0205\text{mm}$ 均等係数 $U_e=7.80$
 土粒子の密度 $\rho_s=2.653(\text{g}/\text{cm}^3)$

間隙比 e	平均間隙径深 h (mm)	毛管径深 D (mm)	h/D
0.968	0.0009060	0.0008136	1.11
0.865	0.0008094	0.0006647	1.22
0.814	0.0007619	0.0006148	1.23
0.760	0.0007114	0.0005942	1.20

2.4 透水係数の推定と粒度分布

透水係数と粒度分布の関係は、Hazen, Creager等多くの研究者により提案されているが、その適用範囲は均一な砂や粘土に限られている。いわゆる砂や粘土の中間にある砂質土や粘性土も、10%粒径 d_{10} や20%粒径 d_{20} などの粒径を因子として拡張することも可能であるが、粒度分布からみるとこれらの諸量だけでは粒度特性を表現することはできない。つまり広範な粒度分布の特性をとりいれた推定方法の研究が望まれる。

本研究では土の粒度分布が対数正規分布で近似化されるという仮定のもとで、径深に相当する平均間隙径深 h 、平均水膜厚 b をモデル化した。ここで演繹された間隙径モデルと透水係数を対比しながら物理的意味を考察した。

2.4.1 透水係数と間隙径モデル

土の透水係数特性をマクロな構造をベースにして考察する時、Hagen-Poiseuilleの水管モデルが用いられる。このモデルによる透水係数は、動水勾配を1とするならば、式(2.4.1)で示され、管内水流径深の2乗に比例することを示している。

$$k \propto \frac{n}{2} D^2 \quad (2.4.1)$$

ここに k ：透水係数， n ：間隙率， D ：径深である。土粒子を囲む水膜は物理的には自由水と吸着水に分解され、吸着水は水の流れにはほとんど寄与しない。このため、この部分は除外して考える必要があるが、吸着水の厚さを求めることは困難である。本研究では概略的ではあるが平均間隙径深 h と見掛けの平均水膜厚 b を用いて、式(2.4.1)を参考に透水係数に対する関係式を誘導した。

中間土の透水係数を研究した文献^{13), 14)}のデータを用いて平均間隙径深 h と透水係数 k を両対数で整理したのが図-2.4.1である。図によると用いた試料の粒度は広範囲に及んでいるが、透水係数 k と平均間隙径深 h は両対数紙上でほぼ直線的な関係にある。これらの図から、式(2.4.2)が近似的に得られる。

$$\log k = 2.87(1 + \log h) \quad (2.4.2)$$

ここに、透水係数 k ：cm/s，平均間隙径深 h ：mmである。透水係数 k は $10^{-7} \sim 10^0$ cm/sと幅広く分布しているが、平均間隙径深 h が 10^{-4} mm \sim 10^{-1} mmの範囲では、式(2.4.2)によってほぼ1オーダー程度の誤差で透水係数 k を推定できることを示している。

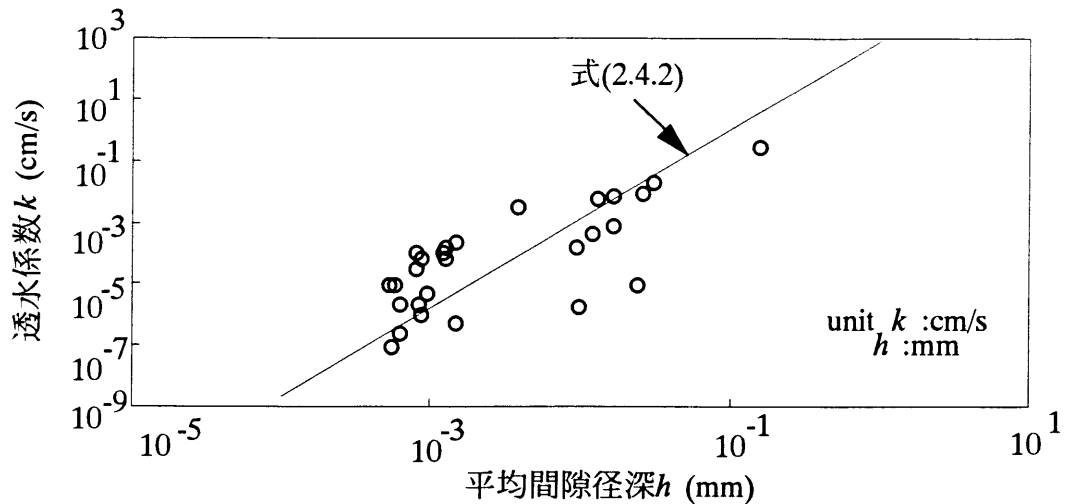


図-2.4.1 透水係数と見掛けの間隙厚さ

土質分野でよく使用される Hazen と Creager の既往の提案式は粒度分布の中から、10% 粒径 d_{10} や 20% 粒径 d_{20} 等のただ 1 個の特性値を用いて、透水係数 k を推定するのに対し、式(2.4.2) は均等係数 U_c と土の締め具合を示す間隙比 e をとり入れた形になっており、幾分幅広い粒度分布と間隙状態に対応できる推定式と考えることができる。また既往の提案式では有効径 d_{10} を基礎にしたものが多いが、10% 粒径 d_{10} が個数基準粒度分布の平均粒径、あるいは間隙の大きさに対比できるのは均等係数が 1~2 程度の均一な粒度分布の材料についてであり、均等係数 U_c がこれより大きくなるに従い有効径 d_{10} の幾何学的意味があいまいになること、あるいは間隙比が小さければ平均間隙径深の 2 倍に対応する間隙径に比べ大きくなることは先に示した。従って、有効径 d_{10} に代表される代表的粒径だけでは透水係数を関係させることは無理があり、間隙径モデルに立脚した式の展開が必要になる。式(2.4.2)はそのひとつの提案式といえる。

2.4.2 透水係数の推定式の比較について

粒度分布から透水係数を推定する公式¹⁵⁾として実務的によく用いられているのは式(2.4.3)、(2.4.4)である。

$$\text{Hazen 式} : k = 100de^2 \quad (de : \text{cm}) \quad (2.4.3)$$

$$\text{Creager 式} : k = 0.359d_{20}^{2.327} \quad (d_{20} : \text{mm}) \quad (2.4.4)$$

ここで Hazen 式で係数を 100 としたのは種々の土質を対象としているため、係数から考えると中央値になる値を選択した。また Creager 式は一般に表で示されているが、横沢の文献¹⁶⁾から式(2.4.4)を選択した。透水係数の単位はいずれも (cm/s) である。

図-2.4.2は、透水係数の実験値^{17)~24)}と上式(2.4.2)~(2.4.4)による推定値の精度を示したものである。図より相当のばらつきがみられるが、それぞれの式について比較してみる。その場合、変数Xを式(2.4.5)で定義し、Xの平均及び分散を用いて検討する。

$$X = \log k(\text{実験}) - \log k(\text{推定}) \quad (2.4.5)$$

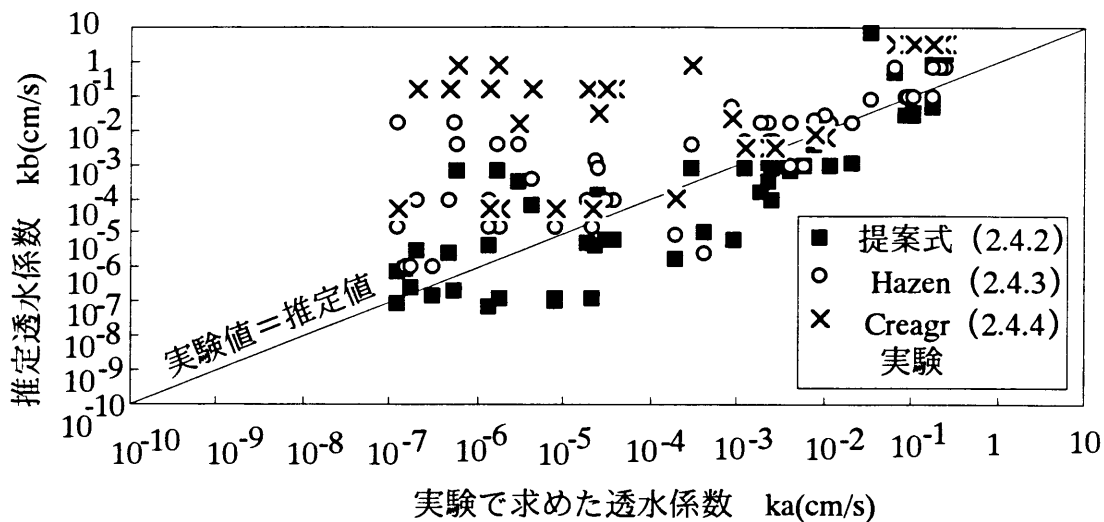


図-2.4.2 透水係数の推定式の比較

表-2.4.1 推定式の精度

推定式	\bar{X}	σ_{n-1}	$\bar{X} - \sigma_{n-1}/2$	$\bar{X} + \sigma_{n-1}/2$
Hazen式 (2.4.3)	-0.920	1.149	-1.495	-0.345
Creager式 (2.4.4)	-1.369	2.007	-2.373	-0.365
提案式 (2.4.2)	0.112	1.297	-0.537	0.761

まず、全体的な範囲での推定精度について考えてみる。表-2.4.1は、上記3式の差の平均 \bar{X} 、標準偏差 σ_{n-1} 、 $\bar{X} - \sigma_{n-1}/2$ 、 $\bar{X} + \sigma_{n-1}/2$ を示している。表-2.4.1より、式(2.4.3)、(2.4.4)によるHazen、Creagerの推定値に対し、実験値は小さめになり、式(2.4.2)による推定値に対しては実験値は大きめになる傾向がみられる。そこで平均値を基準に推定範囲を示すと、式(2.4.3)のHazen式では実験値は推定値の1/10倍程度、式(2.4.4)のCreager式では1/20倍程度、式(2.4.2)の提案式では1.3倍程度の精度である。

従ってこれらの範囲からすれば、提案式は1オーダー程度の透水係数の変動内で概略的な値が推定できることを示している。

図-2.4.2を透水係数のオーダーで区分して検討する。実験値の値を基準にすると、推定透水係数が 10^{-4} cm/s以上の傾向は、 10^{-4} cm/s以下のゾーンの傾向とは異なり、ばらつきがやや小さいことがわかる。そこで透水係数を2つに分けて 10^{-4} cm/sec以上のゾーンの推定精度を検討したのが表-2.4.2である。

表-2.4.2 推定透水係が 10^{-4} cm/s以上の精度

推定式	\bar{X}	σ_{n-1}	$\bar{X} - 1/2 \sigma_{n-1}$	$\bar{X} + 1/2 \sigma_{n-1}$
Hazen式 (2.4.3)	-0.270	0.667	-0.604	0.064
Creager式 (2.4.4)	-0.229	0.863	-0.661	0.203
提案式 (2.4.2)	0.352	0.806	-0.051	0.755

表-2.4.2に示した平均値から推定精度を検討すると、Hazen式(2.4.3)の推定値に対し、実験値は1/2倍程度、Creager式(2.4.4)では1/2倍程度、提案式(2.4.2)は2倍程度の推定精度となる。これを全体を比較対象とした範囲の精度と比べてみると、Hazen式(2.4.3)、Creager式(2.4.4)の精度はあがっているのに対し、提案式(2.4.2)は1.1から2倍となり若干おちている。しかし、概略的な推定精度としては大差がないものと考えられる。

次に推定透水係数 10^{-4} cm/s以下の領域の推定精度を検討したのが表-2.4.3である。

表-2.4.3 推定透水係数 10^{-4} cm/s以下の精度

提案式	\bar{X}	σ_{n-1}	$\bar{X} - 1/2 \sigma_{n-1}$	$\bar{X} + 1/2 \sigma_{n-1}$
Hazen式 (2.4.3)	-1.379	1.102	-1.930	-0.828
Creager式 (2.4.4)	-3.453	1.859	-4.383	-2.523
提案式 (2.4.2)	-0.022	1.424	-0.734	0.690

表-2.4.3より、それぞれの推定式の精度には顕著な差がみられる。Hazen式(2.4.3)では実験値は推定値に対し1/25倍程度で1~2オーダー異なり、さらに推定精度が悪くなる。一方、Creager式(2.4.4)は平均値で比較する限り推定値の約1/3000になる。これに対し提案式は、ほとんど同じ値を推定することを示している。

これまでの検討は平均値 \bar{X} の大きさを根拠に推定精度を求めたが、分散 σ_{n_1} など考慮しても、大略的な推定精度の傾向は \bar{X} からの推定結果とほとんど変わらないだろうと考えられる。

以上の比較結果は下記のように整理される。

Hazen式：全体的には、実験値は推定値に対し、1/50～1/2程度のばらつきがあり1～2オーダー小さくなる傾向にある。

しかし、 10^4 cm/sを境に推定精度が異なり、 10^4 cm/s以上では、1/5～1倍程度で良好な精度がみられる。 10^4 cm/s以下の領域では、1/100～1/10となり、実験値に対し1～2オーダー大きな値を与えるようになり精度がおちる。

Creager式：全体的には、実験値は推定値に対し1/300～1/2程度のばらつきがあり、推定値に対し1～2オーダー小さくなる傾向にある。しかし、 10^4 cm/s以上の領域では実験結果は推定値に対し1/5～2倍程度であり推定精度がよい。 10^4 cm/s以下の領域では実験結果に対し1/20000～1/300倍程度で、実験値は推定値に対し2～4オーダー小さい値となる。

提案式：全体的には実験値は推定値に対し1/5～6倍程度であり、 10^4 cm/s以上の領域では1～6倍程度の範囲に分布し、 10^4 cm/s以下の領域では1/5～5倍程度の範囲で、ほぼ1オーダーの変動で推定できる。

この結果よりHazen式、Creager式は、 10^4 cm/s以上の透水係数を与える土質の場合有効な推定式となるが、 10^4 cm/s以下の領域での適用には問題がある。これに対し、提案式は $10^7 \sim 10^0$ cm/sの広範囲にわたって1オーダー程度の精度で実験値を推定できる。

この違いを式の構造から検討してみる。Hazen式、Creager式は、式(2.4.6)で統一的に表現される。

$$\log k = \alpha + \beta \log d \quad (2.4.6)$$

ここに α 、 β は定数、 d は粒径である。一方、式(2.4.2)に示される提案式は、形の上からは式(2.4.7)に展開される。ここで、飽和度1の場合は平均水膜厚 b =平均間隙深 h であるから、式(2.3.8)を用いて展開している。

$$\log k = 2.87 \{ 0.47 + \log w - 0.434 (0.5 \ln^2 \sigma_w) + \log d_{50} \} \quad (2.4.7)$$

Hazen、Creagerの両式は広範な土質に対し α 、 β は一定であるが、式(2.4.7)では、含水比や粒度分布の分散により、式(2.4.6)の α に対応する部分が異なった関係になっているところに違いがある。そして、3式は類似した式ではあるが、間隙比や含水比等の二次素因を含むか否かの違いが、提案式の推定範囲を広げていると考えられる。

2.4.3 不飽和土の透水係数

一般に土中水の存在形態は重力水、毛管水、吸着水、結合水に分類され、物理化学的性質も異なったものとされている。あるいはHazen-Poisuilleのモデルで示されているように、水の流速は粒子表面から離れるに従い早くなる。つまり土中水の存在形態あるいは水膜の厚さにより、土中水の移動も異なってくるのが予想される。従来提案式はどちらかと言えば土の構造を土粒子骨格でモデル化し、土粒子骨格がつくる間隙と透水性を関連させるものが多かった。しかし、土中水の物理性を問題とする場合、土中水の存在形態から透水係数を考察することも意義あるものと考えられる。そこで図-2.4.1について再度検討してみる。文献によると図で用いられた試料の透水係数は飽和土に近い試料を用いた試験結果である。飽和土の場合、平均間隙径深 h は平均水膜厚 b に等しいと考えることができるので、 $b = h$ であり式(2.4.2)は式(2.4.8)に書き直すことができる。

$$\ell \log k = 2.87 (1 + \ell \log h) = 2.87 (1 + \ell \log b) \quad (2.4.8)$$

式(2.4.8)は透水係数 k は平均水膜厚 b に関係していることを示している。この場合、平均水膜厚 b の範囲は実験結果からは 10^{-4} mm $\sim 10^{-1}$ mmにある。付着形態や存在形態が異なっている水膜の厚さを測定することは種々問題があるが、文献²⁵⁾によると 10^{-3} mm $\sim 10^{-1}$ mmが与えられている。つまり、式(2.4.8)から求められる範囲の水膜は吸着水から自由水の範囲に対応しているとも考えられる。すなわち平均水膜厚 b が等しければ不飽和土、飽和土の区別なく透水係数はある程度等しいのではないかと考えることができる。そこで、式(2.4.8)を改めて整理して、式(2.4.9)、(2.4.10)のように書く。

$$\text{飽和土の透水係数} \quad \ell \log k_{\text{sat}} = 2.87 (1 + \ell \log h) \quad (2.4.9)$$

$$\text{不飽和土の透水係数} \quad \ell \log k_{\text{unsat}} = 2.87 (1 + \ell \log b) \quad (2.4.10)$$

飽和土の場合は $b = h$ であるから勿論両式は一致する。また不飽和土の場合、式(2.3.6)、(2.4.9)、(2.4.10)より、式(2.4.11)の関係が得られる。

$$k_{\text{unsat}} = k_{\text{sat}} \cdot S_r^{2.87} \quad (2.4.11)$$

ここに、 S_r ：小数表示の飽和度である。

図-2.4.3は不飽和透水試験結果の一例²⁶⁾である。図には式(2.4.11)の関係も示してあるが、提案式は細砂あるいはIrmayの理論式に類似した結果を与えている。一般に、Irmay²⁷⁾、Corey²²⁾、Auerjanov²⁸⁾によると、不飽和透水係数は飽和度と、式(2.4.12)の

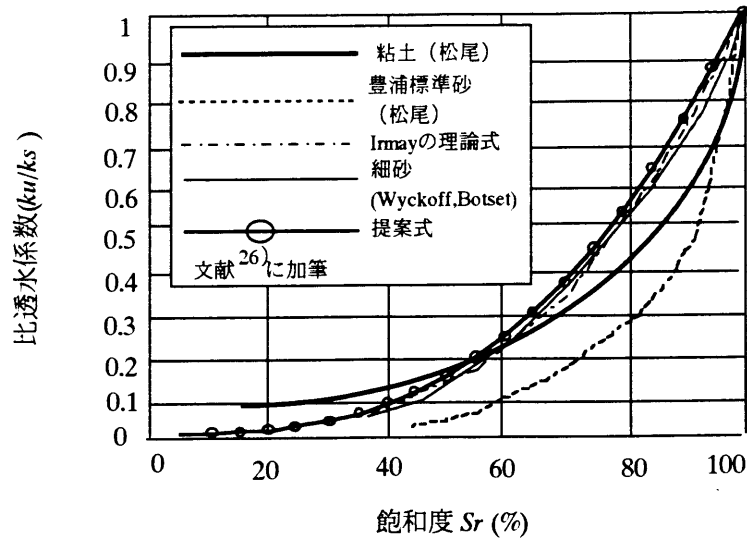


図-2.4.3 不飽和透水係数

関係にあると言われている。

$$k \propto S_r^{3\sim 4} \quad (2.4.12)$$

また水の移動が考えられない土粒子境界付近の吸着水を除外した式(2.4.13)も提案されている。

$$k \propto \{(S_r - S_{wo}) / (1 - S_{wo})\}^3 \quad (2.4.13)$$

式(2.4.10)は、水の存在形態との関連でなお検討する余地があるが、平均間隙径深 h 、平均水膜厚 b の概念で透水試験結果を整理し、その結果、不飽和透水係数は飽和度の2.87乗に比例するという式(2.4.12)、(2.4.13)に対応するような式(2.4.11)が導けたということは、透水係数は間隙の大きさというよりも水の存在形態によって決まる面があることを示していると考えられる。

図-2.4.4は飽和度と透水係数の推定精度を調べたものである。かなりのばらつきはあるが、約50%は実験値と同じオーダーの範囲にある。飽和度の範囲を限定して調べると、飽和度 S_r が $S_r > 0.8$ であれば提案式は実験結果に対して概略1オーダー以内の推定精度で推定できる。これにたいし、 $S_r < 0.8$ になればばらつきが大きくなる傾向を示している。しかし試料の粒径、均等係数はかなりばらつき、不飽和透水係数は 10^{-7} cm/s \sim 10^0 cm/sの広い範囲にあるが、推定精度が1 \sim 2オーダー以内にある。不飽和透水試験の困難さを考慮すれば式(2.4.11)は概略的に不飽和土に対して有効性を示している。

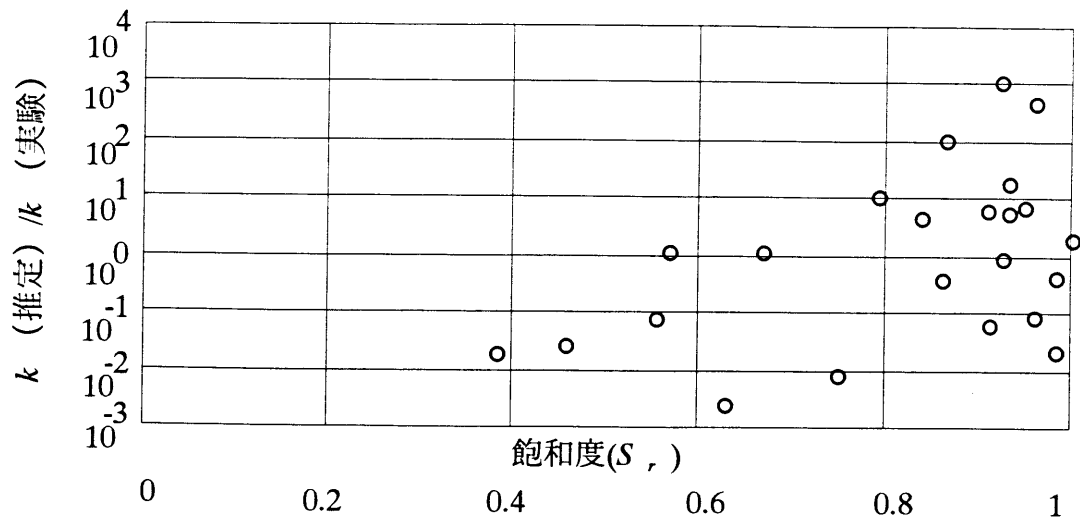


図-2.4.4 飽和度と推定精度

2.5 内部摩擦角 ϕ' と粒度分布

2.5.1 既往の提案式の検討

内部摩擦角 ϕ' の推定方法は多くの研究者により提案されている。この場合の根拠として、ダイレイタンシー効果が内部摩擦角 ϕ' の増減に関係する因子であり、その効果を左右するものとしてマクロ的には間隙比 e (あるいは間隙率 n) , 相対密度 D_r , 乾燥密度 ρ_d , 細粒分あるいは粗粒分含有率, 形状, 最大粒径などがとりあげられている。そのうち最も簡潔で比較的に利用されている式は最上の提案式^{29), 30)} で, 式(2.5.1)で示され, 内部摩擦角 ϕ' の \sin 関数は間隙比に反比例する関係にあることを示している。

$$\sin \phi' = \frac{k}{1+e} \quad (2.5.1)$$

式(2.5.1)の k は粒径や形状, 粒度などの諸因子との関係が研究されるが, 均等係数の対数 $\log U_c$ に対する直線関係³¹⁾ や最小間隙比 e_{\min} との直線関係³²⁾ が提案されている。簡潔性の面からみると Caquot-Kerisel の提案式³³⁾ 式(2.5.2)も興味深い。

$$e \cdot \tan \phi' = \alpha \quad (2.5.2)$$

式(2.5.2)の右辺 α は土質によって決まる定数であり, 砂の場合 0.50, シルト 0.45, 粘土 0.30 とされている。式(2.5.1)と式(2.5.2)を比較すると式(2.5.3)が得られる。

$$k = \alpha \cos \phi' + \sin \phi' \quad (2.5.3)$$

α は細粒分が多くなれば小さくなる。従って, 式(2.5.3)に示される式の構造と土の強度特性から類推すると, 内部摩擦角 ϕ' が同じであれば α は土質によって異なるので式(2.5.1)の定数 k も細粒分が増えるに従って小さくならなければならない。つまり, 式(2.5.1)も粒度特性によって影響されることを意味している。本研究は平均間隙径深 h の概念を用いて内部摩擦角 ϕ' と土の構造特性との関連を統一的に研究しようとするものであるが, 式(2.5.1), (2.5.2)の式の構造を参考にして関係式を誘導した。図-2.5.1, 2.5.2は, Caquot-Kerisel の関係式を検証するため, 文献^{34) ~ 36)} のデータを使い $e \cdot \tan \phi' \sim \log d_{10}$ の関係で整理したものである。データはまさ土, 河床砂礫, シラス等の広範な礫質土~砂質土で間隙比は 0.2~0.7 の範囲にある。

図-2.5.1ではデータの基本的なばらつき特性を示すために内部摩擦角 ϕ' ~ 間隙比関係を示した。図からは間隙比に対する強い相関はみられない。しかし, 図-2.5.2によると $e \cdot \tan \phi'$ は 10% 粒径 d_{10} の対数との関係がみられ, d_{10} が小さいと $e \cdot \tan \phi'$ は

小さく、従って α が小さくなることを意味し、 d_{10} が大きいと $e \cdot \tan \phi'$ も大きくなり、従って α も大きくなる傾向がみられる。

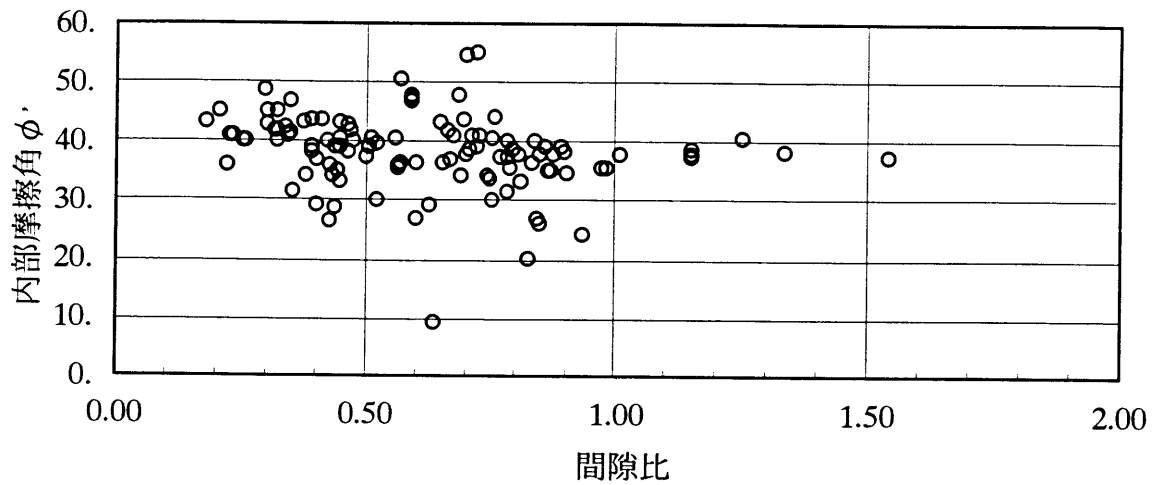


図-2.5.1 間隙比と内部摩擦角 ϕ'

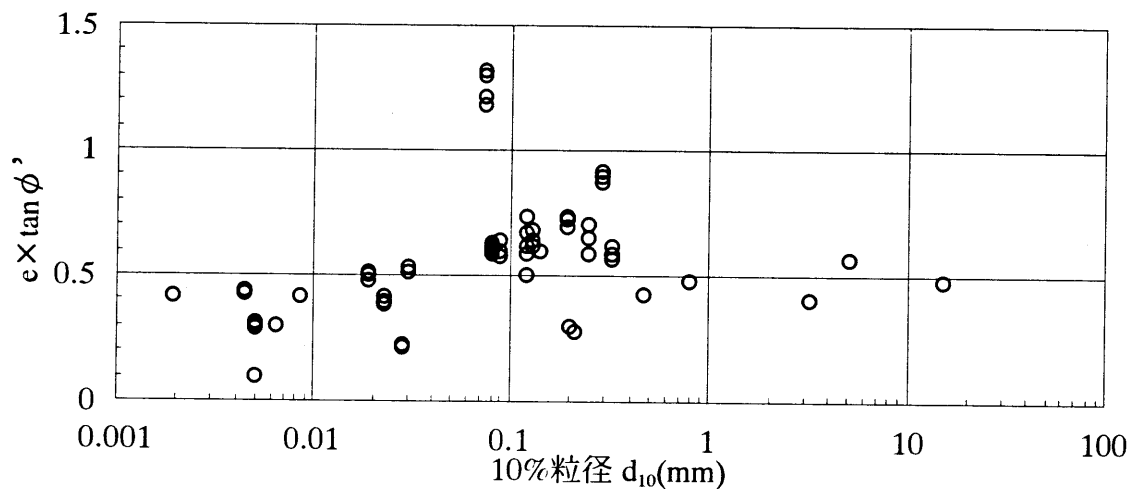


図-2.5.2 d_{10} と $e \cdot \tan \phi'$ の関係

しかし、ばらつきのため、必ずしも d_{10} の対数に比例的に対応しているとはいえない。そこで10%粒径 d_{10} の範囲をわけて $e \cdot \tan \phi'$ の分類を行うと、以下の関係がみられる。

$$10^{-3} \text{ mm} < d_{10} < 10^{-1} \text{ mm} \quad e \cdot \tan \phi' = 0.3 \sim 0.5$$

$$10^{-1} \text{ mm} < d_{10} < 10^0 \text{ mm} \quad e \cdot \tan \phi' = 0.5 \sim 0.7$$

この二区分の境界付近の $10^{-2} < d_{10} < 10^{-1}$ の範囲は見方によっては漸次増加する傾向にとれないこともないが明確ではないので二つに区分している。このように $10^{-3} \text{mm} < d_{10} < 10^0 \text{mm}$ の広い粒度範囲の値はCaquot-Keriselの提案と類似しており、データとしては一般的な内部摩擦角 ϕ' の範囲といえる。つまりCaquot-Keriselは土質ごとに α の値を決めているが、図-2.4.2は10%粒径 d_{10} を変数にして ϕ' の変化特性を分類できることを示しており、粒径との関連性を予想させる。すなわちここで強調したいことは内部摩擦角 ϕ' の変化は間隙比 e だけではなく、10%粒径 d_{10} にも影響されることである。

2.5.2 間隙径モデルと内部摩擦角 ϕ'

Caquot-Keriselの式の左辺 $e \cdot \tan \phi'$ は、平均間隙径深 h を用いた $h \cdot \tan \phi'$ に拡張することができる。そこで、これらの強度特性傾向を平均間隙径深 h を用いて整理する方法を考えてみる。平均間隙径深 h は、先に書いたように粒子間の間隙を示す一種の指標と考えることができるが、強度との関係を検討する場合、ミクロ的な考え方が手がかかりとなる。ミクロ的な分野の研究では粒子接点数、粒子接点角、間隙径などの粒子特性があげられる。一般的には、こうした諸因子の分布特性は粒度、粒径、形状、表面摩擦あるいは堆積条件、続成作用条件などにより異なってくるが、本論文ではこれらの因子の中から粒度分布をとりあげ、平均的には間隙空間の厚さや粒径から考えられる幾何学的条件により決まるものと考えた。つまり、構造的には粒子接点数が主要な因子になるが、その場合、平均間隙径深 h が大きければ接点数は少なく、平均間隙径深 h が小さくなると接点数は多くなるだろうことが直観的に予想される。しかし、後の節で示すが最大・最小密度の研究では、密度の大きさは d_{10} あるいは個数分布の平均径 d_g 等により制約をうけていることがわかっている。このことを考えると接点数は単に平均間隙径深 h に対応するだけでなく、その広がりや粒径で正規化した h/d_{10} 等の幾何学的関係が必要と考えられる。

本研究のテーマは粒度分布の関数として内部摩擦角 ϕ' を推定することである。従って、近似的に、式(2.5.4)に示される関数形を仮定する。

$$\tan \phi' = A \frac{d_{10} \beta}{h \alpha} \quad (2.5.4)$$

諸戸³²⁾は $\bar{k} = \alpha + \beta e_{\min}$ として最小間隙比 e_{\min} の時の内部摩擦角 ϕ' を式(2.5.5)で与えた。

$$\sin \phi' = \frac{\bar{k}}{1+e} = \frac{\alpha + \beta \cdot e_{\min}}{1+e_{\min}} = \beta + \frac{\alpha - \beta}{1+e_{\min}} \quad (2.5.5)$$

2.6節で示すように最小間隙比 e_{min} の範囲は0.4~0.7に集中しており、この場合 $1/(1+e_{min})$ は0.71~0.59になる。さらに諸戸は $\alpha = 0.44 \sim 0.77$ を与え、それに対応する β は $\beta = 0.40 \sim 0.73$ であるので、 $(\alpha - \beta)/(1 + e_{min}) \ll \beta$ になる。従って式(2.5.5)の右辺第2項は第1項に比べかなり小さくなるので間隙比 e_{min} の ϕ' への影響は小さく、従って最小間隙比に対応する内部摩擦角 ϕ' の大きな部分は間隙比には依存しない材料定数と考えられる。

以上の検討結果から式(2.5.4)を分析すると、Aは概略的な内部摩擦角 ϕ' に関する値であり、 d_{10}^β / h^α は間隙比に対する微調整的な役割が考えられる。この最も簡単な場合である $\alpha = \beta = 1$ の時の d_{10}/h と $\tan \phi'$ の関係を整理したのが図-2.5.3である。

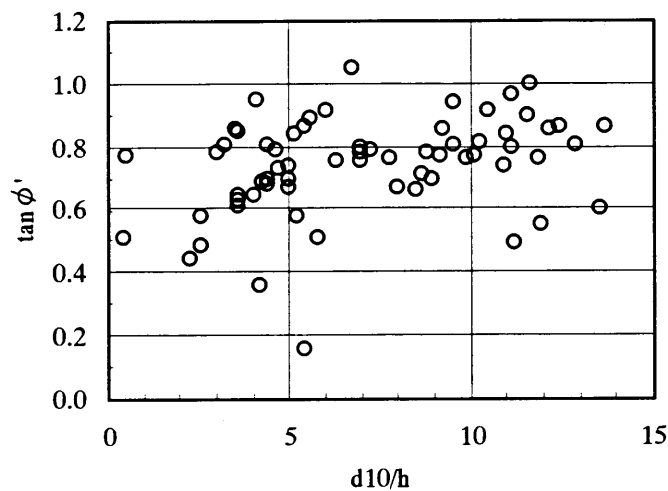


図-2.5.3 $\tan \phi' \sim d_{10}/h$

図によるとデータは非常にばらついており、 d_{10}/h との単純な関係にはないことがわかるが、細かく見ると、 $d_{10}/h > 7 \sim 10$ の領域では $\tan \phi'$ の変化はあまりみられず、 $\tan \phi' = 0.7 \sim 0.8$ ($\phi' = 34 \sim 39^\circ$) 付近にばらついていることがわかる。ところが $d_{10}/h < 7 \sim 10$ となると、 $\tan \phi'$ は $0.5 \sim 1.0$ ($\phi' = 26 \sim 45^\circ$)の範囲でばらついているが、 d_{10}/h が小さくなるとともに $\tan \phi'$ の値は小さくなる傾向がある。

図-2.5.4は、 $h \cdot \tan \phi'$ と d_{10} の関係を両対数で示したものである。この関係も式(2.5.4)の特殊な場合である。例えば $\log(h \cdot \tan \phi')$ と $\log d_{10}$ との間に直線性を仮定するならば、式(2.5.4)の α は1で、 β が勾配によって決まる。図によると、10%粒径 d_{10} は $10^{-3} \text{ mm} \sim 10^0 \text{ mm}$ 、平均間隙径深 h が $10^{-4} \text{ mm} \sim 10^0 \text{ mm}$ と広範に分布しているが、 $h \cdot \tan \phi'$ と10%粒径 d_{10} は両対数紙上で直線的な関係を示している。

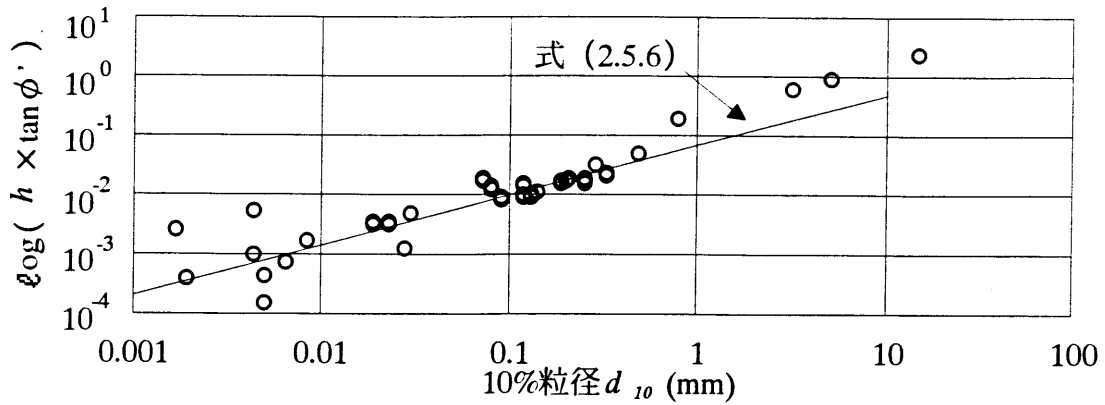


図-2.5.4 $h \tan \phi'$ と d_{10} の関係

この関係式は式(2.5.6)であらわされる。

$$h \cdot \tan \phi' = 0.0692 d_{10}^{0.835} \quad (2.5.6)$$

従って、 $\tan \phi'$ は d_{10}^β / h^α の関数として示され、しかも種々の粒径であるにもかかわらず、同じような統一的な因子により $\tan \phi'$ が規定される可能性を示している。

従って、 $\tan \phi'$ は d_{10}^β 、 h^α の関数として示されることは事実であるが、 α 、 β の決定方法が問題となる。図-2.5.4より、式(2.5.6)が10%粒径 d_{10} が小さい範囲でばらつきが大きいことを考慮して、試行的に $\tan \phi'$ と d_{10}^β / h^α の関係を求め、式(2.5.7)を得た。最適化問題としての研究課題は残されているが、本研究の段階では式(2.5.7)を基本式とし、推定精度の研究を検討した。

$$\tan \phi' \doteq 0.85 \frac{d_{10}^{0.09}}{h^{0.02}} \quad (2.5.7)$$

式(2.5.7)により、粒度試験や間隙比の測定結果より d_{10} 、 d_{50} 、 e 、 G_s 、 U_c を与え、内部摩擦角 ϕ' を推定し、実測値と対比したのが図-2.5.5である。図より実測値と推定値の差を確率変数として推定精度を調べると、

$$x = -0.5^\circ \quad \sigma_{r1} = 4.98^\circ$$

となり平均値で約1度以内、分散を考慮するならばほとんど $\pm 5^\circ$ の範囲で推定できることを示している。

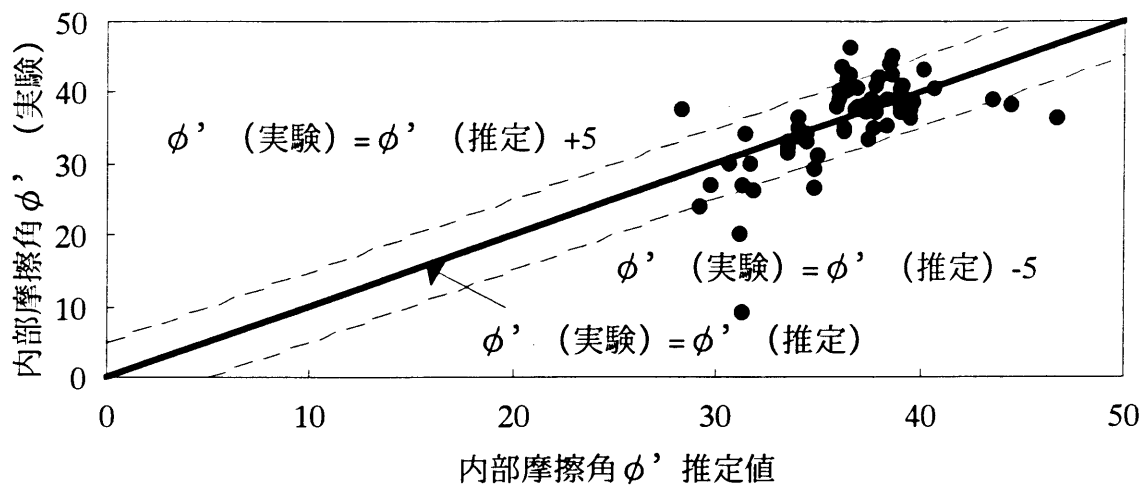


図-2.5.5 内部摩擦角の推定値と実験結果の比較

最上やCaquot-Keriselにより提案された式(2.5.1), (2.5.2)は, 粒度などの土質が異なるごとに k や α の値を変化させねばならなかったが, 式(2.5.7)によると, 粒度特性や間隙比を与えるだけで, 連続的にどの土質にも適用可能であることは, 土質試験結果の統一的整理方法として有効な式と考えることができる。

2.6 最大・最小間隙比と粒度分布

諸戸らは最上の式を拡張し、強度推定式を提案^{31), 32)}している。本研究でも粒度分布と強度の関係式を提案したが、その精度と特徴を把握するために5章で諸戸らの提案式との比較を行った。諸戸の提案式では、最小間隙比は材料によって異なるが、材料定数としており、この最小間隙比と強度定数を関係づけている。諸戸らの強度推定式と本提案式を比較する場合、強度の実験結果を直接用いる方法もあるが、本研究では、間隙径モデルの拡張につながるので、最大・最小間隙比と間隙径モデルの研究を介して比較した。

2.6.1 既往の研究

最大・最小密度に対応する最大・最小間隙比 e_{max} , e_{min} は、試験方法や個人差などによりばらつきはあるが、宮森⁵⁷⁾の研究では、粒径が大きくなれば最大・最小間隙比 e_{max} , e_{min} も大きくなり、また均等係数 U_c の対数に直線的に比例する傾向にあるとされている。そして、定量的な関係として宮森は、Hutchinson, Jownsed の $U_c = 14 \sim 5.0$ の範囲における粒度分布の特性値と γ_{dmax} , γ_{dmin} の関係を紹介しているが、一般的に認められるまでにはいたっていない。

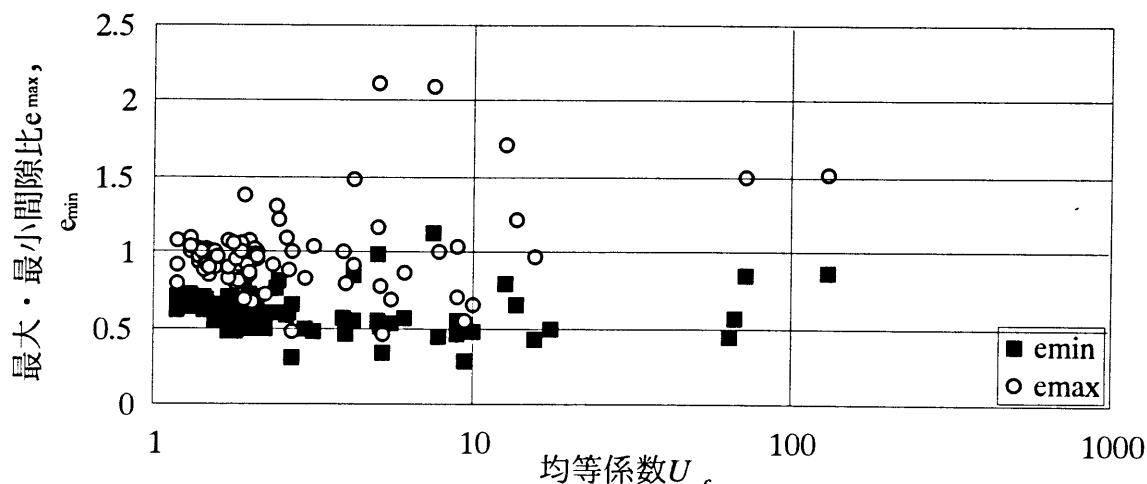


図-2.6.1 最大・最小間隙比と均等係数

図-2.6.1は文献^{58)~80)}のデータを用いて、最大・最小間隙比 e_{max} , e_{min} と均等係数の対数 $\log U_c$ の関係をプロットしたものである。図からは、均等係数 $U_c < 3$ の範囲では最大・最小間隙比 e_{max} , e_{min} の差はかなり明らかで、均等係数の対数に比例するように減少する傾向を示しているが、均等係数 $U_c > 3$ になると、ばらつきが大きくなり、傾

向的な特徴はみられない。

桑山・植下⁸¹⁾の研究成果を踏まえ、李⁸²⁾は式(2.6.1)を提案している。

$$\rho_{d \max} = 0.370 \cdot \ell \log d_{60} + 1.711 \quad (2.6.1)$$

ここに d_{60} の単位はmmである。 $\rho_{d \max}$ が最小密度 e_{\min} に対応するものとすれば、式(2.6.2)が得られる。

$$\rho_{d \max} = \frac{G_s}{1 + e_{\min}} \quad (2.6.2)$$

式(2.6.1), (2.6.2)より、式(2.6.3)が得られる。

$$e_{\min} = \frac{G_s}{0.370 \ell \log d_{60} + 1.711} - 1 \quad (2.6.3)$$

$G_s = 2.67$, $d_{60} = 0.01, 0.1, 1\text{mm}$ の時の最小間隙比 e_{\min} は式(2.6.3)より、最小間隙比 e_{\min} は $e_{\min} = 1.74, 0.99, 0.56$ になる。この式には均等係数 U_c は含まれていないが、図-2.6.1に示す最小間隙比の実験値と上に示した推定値を比較すると図のばらつきから考えてもやや大きな値になることがわかる。特に $d_{60} = 0.01$ と 0.1mm に対応する細粒土の推定値は、実験値に比べ大きな値を示している。上式は土質工学会基準の土の締固め試験(JSFT771-1990)の結果を整理して導かれたものである。従って、式(2.6.3)の推定値と実験値のへだたりを考慮すると、ランマーを落下させる締固め試験方法では細粒分側で締固め不足になることを予想させる。従って、式(2.6.3)は粒度の広い範囲に適用することは困難であることを示している。

2.6.2 間隙径モデルと最大・最小間隙比

これまで示してきたように平均間隙径深 h は10%粒径 d_{10} や比表面積法から得られる平均間隙径と類似しているという結果を踏まえて、本節では最大・最小間隙比の状態が粒径に対してどの程度になるかを明らかにする。とりあげた粒径は10%粒径 d_{10} , 50%粒径 d_{50} , それに個数基準粒度分布から推定される平均粒径 d_g である。

図-2.6.1に示した試験結果を $h/d_{10} \sim \ell \log U_c$ で整理したのが図-2.6.2である。これまでの研究で平均間隙径深 h は見掛け上間隙層厚に対応する量と仮定しているので、この概念を基準に、最大・最小間隙比条件下の幾何学的特徴を調べた。 h_{\max} , h_{\min} は式(2.3.7)より最大・最小間隙比に対応する平均間隙径深に対応している。図によると最大・最小間隙比は $3 < U_c < 10$ の範囲ではかなりばらつきが大きくなっているが、

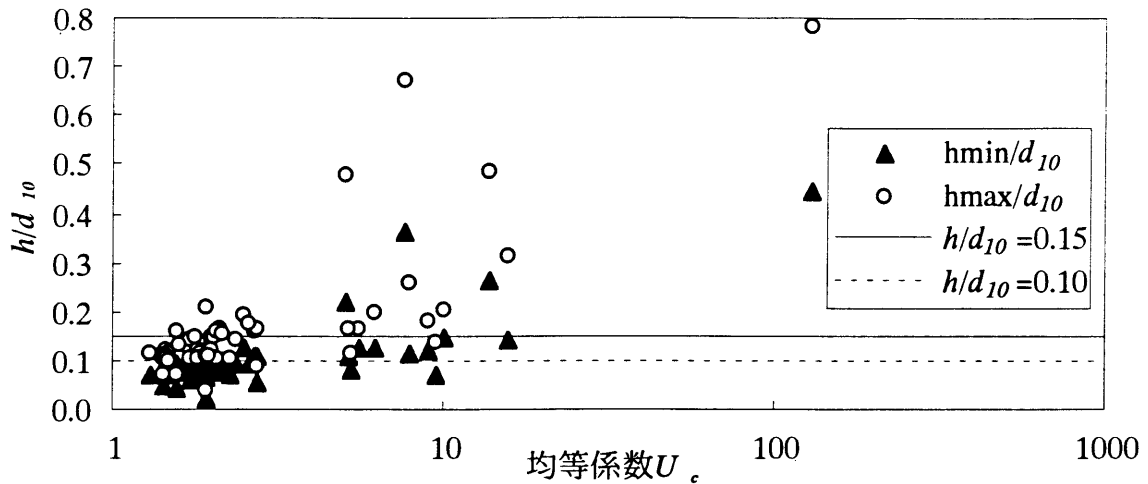


図-2.6.2 最大・最小間隙比における均等係数と h/d_{10} の関係

全体的には h/d_{10} は $\log U_c$ の増大に伴って大きくなる傾向にある。

これらを数値で示すと h/d_{10} の値は最大間隙比の時0.1~0.3, 最小間隙比の時0.05~0.12の範囲にあり, 最大・最小条件時の平均間隙径深 h は10%粒径 d_{10} のオーダーに対応する値であることがわかる。

$$e_{max} \text{ の時 } h_{max}/d_{10} \doteq 0.1 \sim 0.3 \quad (2.6.4)$$

$$e_{min} \text{ の時 } h_{min}/d_{10} \doteq 0.05 \sim 0.15 \quad (2.6.5)$$

平均間隙径深 h は誘導の仮定より1個の粒子が占有する単位表面積あたりの間隙空間の厚さと仮定した。従って単純に $2h$ が間隙径に対応するものと考えれば, h/d_{10} の範囲より, 最大密度の時の間隙径はほぼ10%粒径の0.10~0.3倍程度, また, 最小密度の時の間隙径はほぼ10%粒径の0.2~0.6倍程度になる。つまり, 粒度, 粒径などの土質が異なっても, 力学的な締固めの極限の状態は間隙の大きさからみると材料によらず, 10%粒径 d_{10} の約0.1~0.6倍が可能な範囲といえる。これを間隙径の絶対的な大きさで示すと表-2.6.1のようになる。

表-2.6.1 間隙径の範囲

d_{10} (mm)	$2h_{min}$ (mm)	$2h_{max}$ (mm)
0.001	1×10^{-4} (0.1 μ m)	6×10^{-4} (0.6 μ m)
0.01	1×10^{-3} (1 μ m)	6×10^{-3} (6 μ m)
0.1	1×10^{-2} (10 μ m)	6×10^{-2} (60 μ m)
1	1×10^{-1} (0.1mm)	6×10^{-1} (0.6mm)
10	1 (1mm)	6×10 (60mm)

現在用いられている土質試験法では、10%粒径 d_{10} の最小値は0.001mmである。従って、均等係数が求まるような試料の範囲では表-2.6.1に示すように、10%粒径 d_{10} が0.001~10mmとすると $0.1\mu\text{m}\sim 4\text{mm}$ が最大・最小間隙比に対応する間隙径としてとり得る値である。粒度分布と間隙径の関係を幅広く研究されたものは少ない。この中で青山⁸⁴⁾らのまさ土の研究によると、まさ土の間隙径の平均的な範囲は、 $0.1\sim 10\mu\text{m}$ 付近にあると考えられる。まさ土の10%粒径 d_{10} は風化などにより変化しているが、大略 $0.001\sim 0.1\text{mm}$ とするならば、表-2.6.1より $0.2\mu\text{m}\sim 40\mu\text{m}$ の間隙径が推定されるので実験結果と対応している。

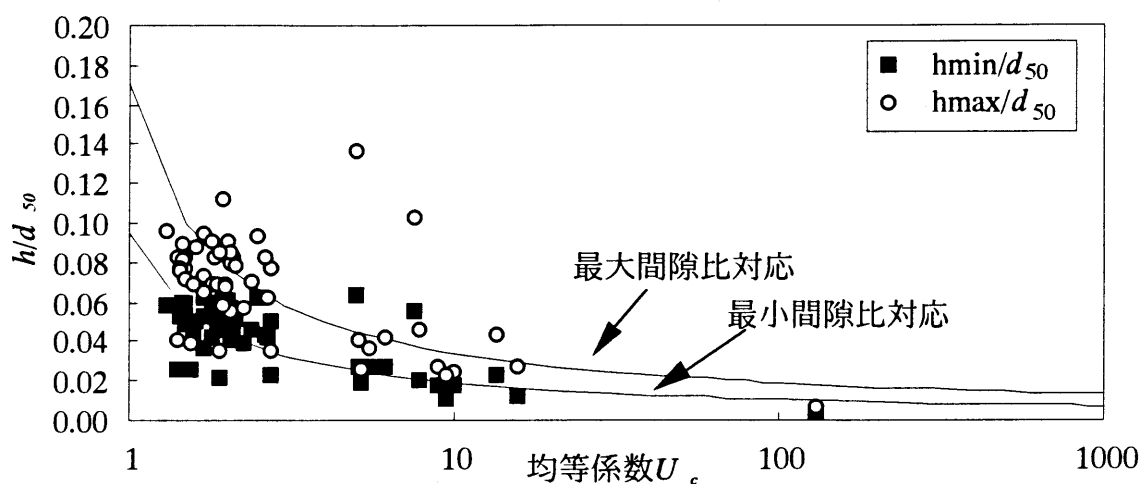


図-2.6.3 h/d_{50} と均等係数

図-2.6.3は、同じデータを $h/d_{50}\sim \log U_c$ の関係で整理しなおしたものである。図によると最大・最小間隙比 e_{max} 、 e_{min} に対応する h/d_{50} は $\log U_c$ に反比例するような関係にあり、その傾向は均等係数 $U_c > 10$ の領域でもいえそうである。また、均等係数 U_c が大きくなると h_{max}/d_{50} と h_{min}/d_{50} の差は小さくなる。これを近似式で示すと式(2.6.6)、(2.6.7)になる。しかし現段階ではこれらの式自体は単なる経験的な特性を示す関係式にとどまる。

$$\frac{h_{max}}{d_{50}} = \frac{0.25}{\{1 + 4 \log_{10} U_c\}^{1.5}} \quad (2.6.6)$$

$$\frac{h_{min}}{d_{50}} = \frac{0.13}{\{1 + 4 \log_{10} U_c\}^{1.5}} \quad (2.6.7)$$

質量基準粒度分布の10%粒径 d_{10} と平均間隙径深 h の関係では、均等径数 U_c が大きくなれば h/d_{10} の値は大きくなる傾向がみられた。従って例えば10%粒径 d_{10} が同じで、均

等係数 U_c が異なる粒度の最大・最小密度に対応する間隙径は、均等係数 U_c が大きくなれば、間隙径も大きくなることを示している。一方、50%粒径 d_{50} を同じにして均等係数 U_c を変えた実験を行なった場合は、均等係数が大きくなれば50%粒径 d_{50} に対し間隙径は小さくなる傾向を示し、10%粒径 d_{10} と50%粒径 d_{50} に対する最大・最小間隙比状態の特性は異った関係を与えている。このことは10%粒径と50%粒径 d_{50} は力学特性に果たす意味が異っていることを示している。

間隙の決まり方は幾何学的形状に影響されることを考えると、やや複雑になるが10%粒径 d_{10} 、50%粒径 d_{50} よりも、個数基準粒度分布の平均径 d_g を用いる方が合理性がある。個数基準粒度分布の平均径 d_g は $d_w=d_{50}$ として式(2.2.25)、(2.2.32)から式(2.6.8)により求められる。

$$d_g = d_{50} \cdot \exp \left\{ -3 \left(0.484 + 0.420 \cdot \ln U_c \right)^2 \right\} \quad (2.6.8)$$

式(2.6.8)より d_g を求め、 h/d_g で整理したのが図-2.6.4である。この図は図-2.6.3の h/d_{50} に比べ、ばらつきがやや小さな関係がみられる。これらの関係を直視によって近似的に導いたのが式(2.6.9)、(2.6.10)である。

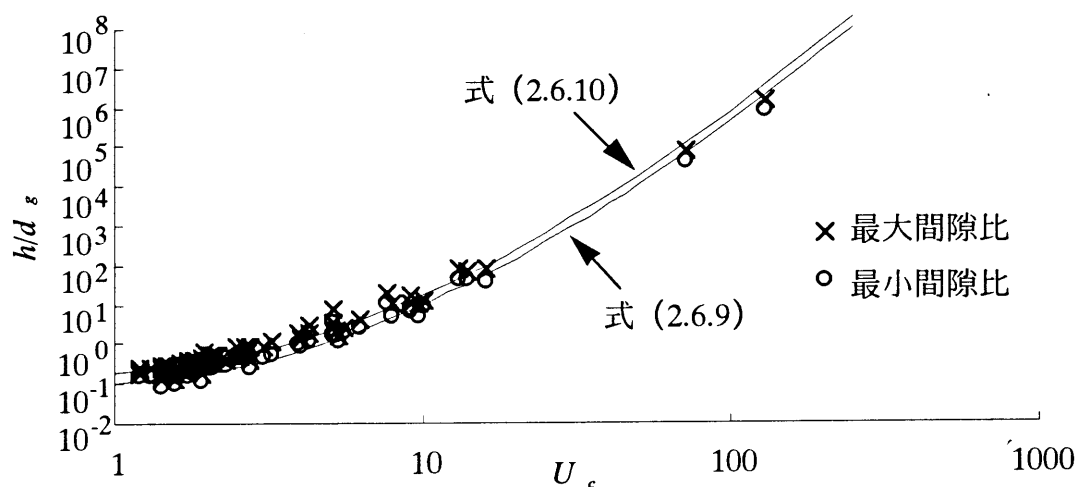


図-2.6.4 個数基準平均径と最大・最小間隙比

$$\frac{h_{min}}{d_g} = \exp \{ (\ln U_c)^{1.72} - 2.3 \} \quad (2.6.9)$$

$$\frac{h_{max}}{d_g} = 1.8 \cdot \frac{h_{min}}{d_g} \quad (2.6.10)$$

式(2.6.9), (2.6.10)より式(2.6.11)が得られる。

$$\frac{e_{max}}{e_{min}} = 1.8 \quad (2.6.11)$$

h/d_{50} の整理結果から得られた式(2.6.6), (2.6.7)では $e_{max}/e_{min}=1.92$ になるので最大間隙比は最小間隙比の約1.8~1.9倍になることを示している。また, 最大・最小間隙比とも均等係数が大きくなれば平均粒径 d_g に対する比が大きくなることは10%粒径 d_{10} に対する最大・最小間隙比特性と類似した関係にある。

図-2.6.5は質量基準平均径 d_{50} , 60%粒径 d_{60} , 10%粒径 d_{10} と均等係数 U_c を変えて式(2.6.9)から最小間隙比と均等係数 U_c の関係を推定したものである。図より, 最小間隙比 e_{min} は以下の特性を有していることが予想される。

- 1)粒径の影響は小さい。
- 2)均等係数 $U_c=5\sim7$ で最小間隙比が最も小さくなり, 均等係数 $U_c=5\sim7$ より大きくなっても, 小さくなっても最小間隙比は増加することを示している。

この式からの結論を根拠に図-2.6.1を点検すると, 最小間隙比に関する限り均等係数10付近で最小値になる傾向が見られ, 広範囲の材料を対象にする場合最小間隙比の全体的な特性と考えられる。

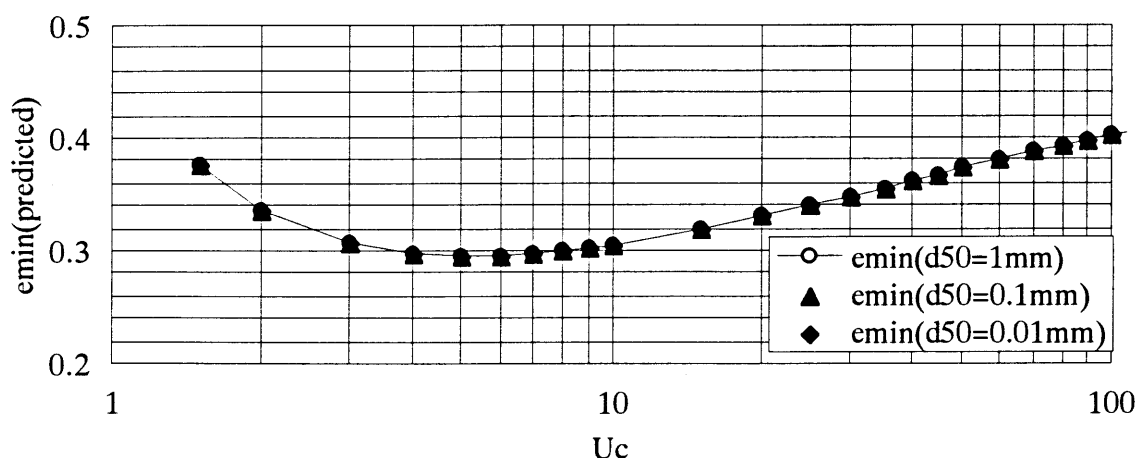


図-2.6.5 最小間隙比と均等係数

2.6.3 実験データによる検証

(A)赤井の実験⁸⁵⁾データとの比較

ここで赤井の実験結果等によって締固め特性について調べてみる。

赤井は Talbotの粒度関係式を用いて実験結果から最大締固め密度特性を研究している⁸⁵⁾。Talbotの粒度曲線は式(2.6.12)で示される。

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad (2.6.12)$$

ここに d :フルイ目の大きさ, D :最大粒径, p :フルイ目の大きさ d を通過する粒子の全体に対する重量比, n :粒度定数である。赤井論文によるとTalbotの実験では最大密度を示す時の n の値は

最大粒径	$D=0.65\sim 1.3\text{cm}$	$n=0.5$
	$D=2.5\sim 5.0\text{cm}$	$n=0.33$
	$D=10\sim 15\text{cm}$	$n=0.25$

となり, 粒径が大きくなると最大密度を与える n は小さくなることを示している。また, Leeはアースダムの転圧試験から $n=0.25\sim 0.5$ を選定規準とすることを示している。赤井も締固め試験結果から $D\div 1\text{mm}$ ではTalbotの指数 $n=0.7$ 付近の粒度が最大密度を与えること, D が大きくなれば最大密度を示す n は小さくなることを示している。

Talbotの粒度曲線から均等係数を求めると式(2.6.13)が得られる。

$$U_c = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \left(\frac{p_{60}}{p_{10}}\right)^{1/n} = 6^{1/n} \quad (2.6.13)$$

Talbotの実験結果から得られた $n=0.25\sim 0.5$ は $U_c=1296\sim 36$ になる。しかし赤井の $D\div 1\text{mm}$ に対応するTalbot指数 $n=0.7$ は $U_c=12.9$ に対応する。また, 赤井は実験結果から均等係数 $U_c=20$ 付近に締固め密度の最大値があることを指摘している。

図-2.6.6は赤井の, Proctorの標準締固めエネルギーによる締固め試験結果である。この図では均等係数10以下では明らかに均等係数が大きくなるとともに, 密度は増加している。しかし均等係数が10以上になると大きくばらついているが, 全体的には均等係数が大きくなるとやや密度が小さくなる傾向がみられる。そして赤井は最大粒径 $D=1\text{mm}$ の時均等径数 $U_c=20$ 付近に最大値があることを示している。式(2.6.9)の最小間隙比の最小値を与える均等係数は $U_c=5\sim 7$ であるから, 赤井の実験結果に比べると最小間隙比を与える均等係数はやや小さい。しかし, 粒度分布によって最小間隙比の最小値が存在するという傾向は式に含まれ, 赤井が示した実験結果にほぼ対

応している。

図-2.6.7は赤井の実験材料として示された粒度特性から、式(2.6.9)によって推定した最小間隙比と、締固め試験から得られた最大密度に対応する間隙比の関係を示したものである。図では、赤井の実験による最小間隙比は式(2.6.9)を用いた推定値よりも大きい。この原因のひとつとして締固めエネルギーや締固め方法の違いが予想される。一般に締固めエネルギーを増加させると締固め密度は大きくなることから、図-2.6.7の実験値の最小間隙比は小さくなる可能性があり、最小間隙比の物理的意味が問題になるが、これは今後の研究課題として残す。本研究では諸戸の強度推定式と比較する上で問題になる最小間隙比の最小値が均等係数10付近に存在することに着目した。

図-2.6.8は粒度の要因を検討するために李⁸²⁾の方法に準じて60%粒径に対する推定誤差を示したが、粒径が異なっても推定値と実験値の間隙比の差0~-0.2の間にあり平均では-0.1のまわりにばらついている。このことは粒径の密度に及ぼす影響に比べ粒度分布が重要な役割をしていることを示している。

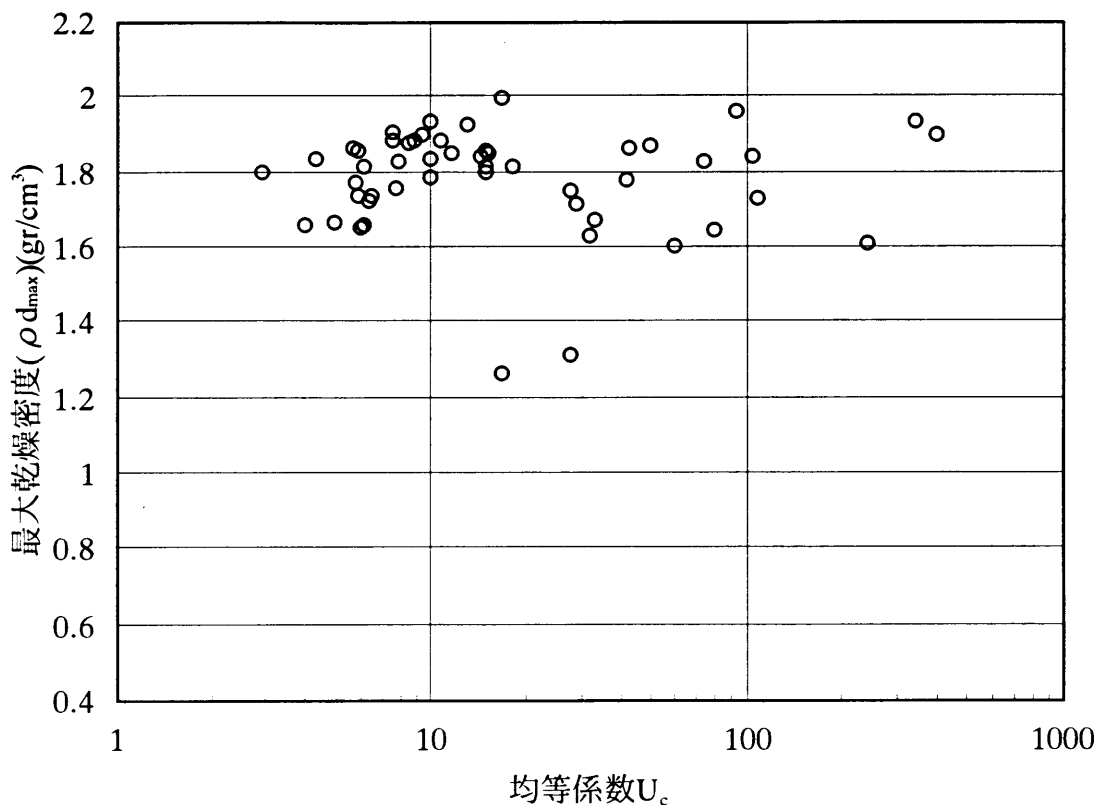


図-2.6.6 赤井の締固めデータ

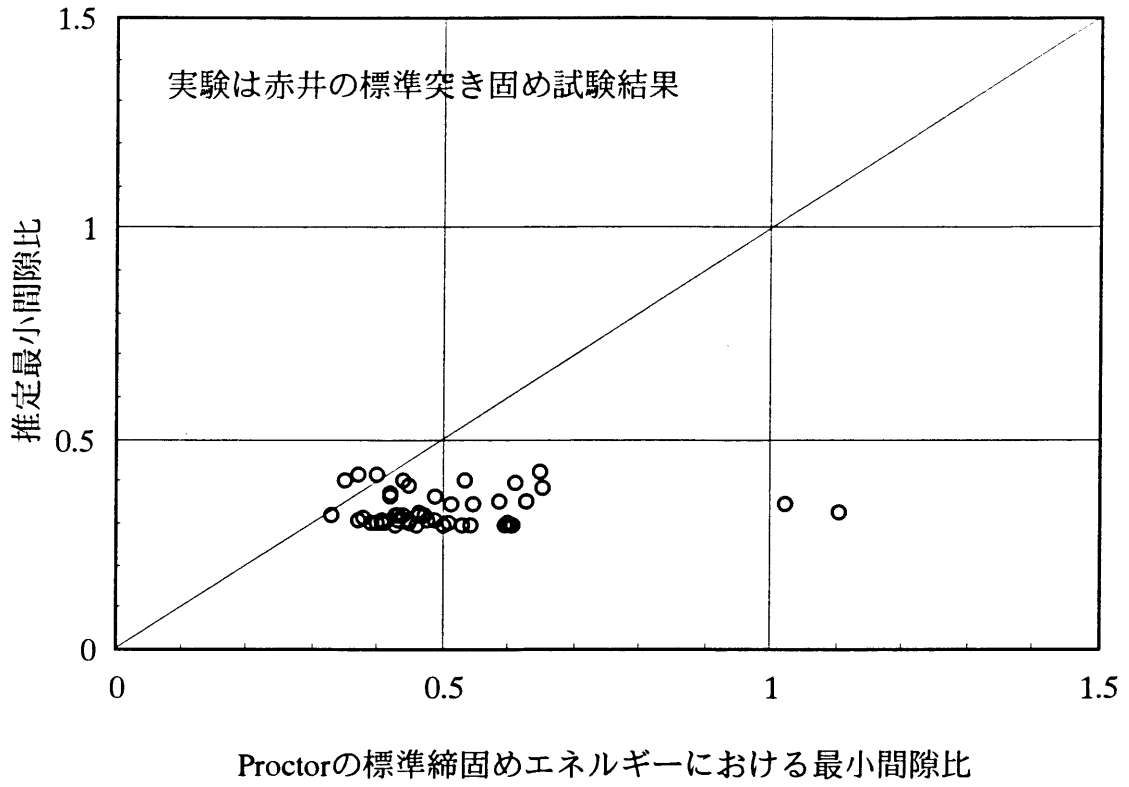


図-2.6.7 密度の推定

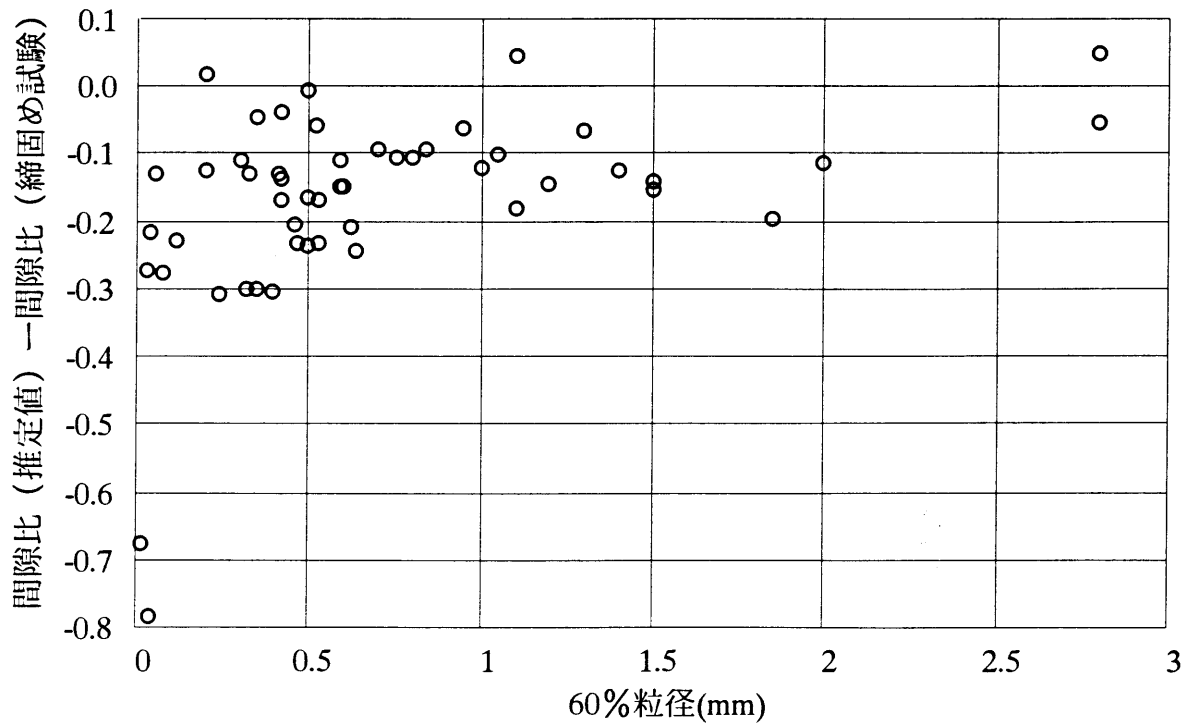


図-2.6.8 60%粒径と推定精度

(B) 坪井らの実験データとの比較

坪井らは混合材料を使用してサンドコンパクションの材料特性と締固特性の関係を調べ発表している^{86), 87)}。これらの研究では、細粒分含有率を変数として最大・最小密度、透水係数、強度の関係が調べられている。坪井らが用いた混合試料の粒度分布は図-2.6.9である。これらの粒度分布から推定した最小間隙比、最大間隙比等を坪井らの実験結果と比較したのが表-2.6.2と表-2.6.3、図-2.6.10である。

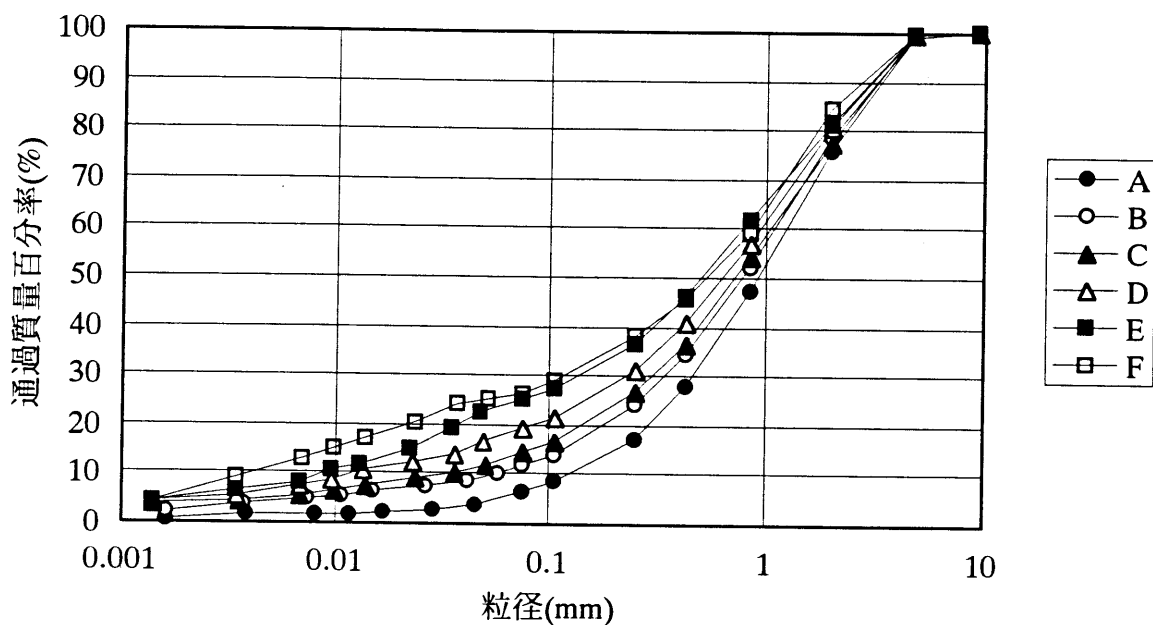


図-2.6.9 試験材料の粒度加積曲線^{86), 87)}

表-2.6.2 坪井らの実験材料^{86), 87)}

材 料 名	使用材料					
	土粒子の密度 $\rho_s(\text{gr/cm}^3)$	10%粒径 d_{10} (mm)	50%粒径 d_{50} (mm)	60%粒径 d_{60} (mm)	均等径数 U_c	細粒分 含有率 F_c (%)
A	2.62	0.012	0.690	1.030	85.8	6.4
B	2.62	0.056	0.790	1.410	25.2	11.5
C	2.62	0.024	0.600	0.880	36.7	16.0
D	2.62	0.013	0.580	0.890	68.5	20.7
E	2.65	0.0109	0.477	0.760	69.7	25.1
F	2.65	0.0042	0.450	0.879	209.3	30.2

表-2.6.3 坪井らの実験結果^{86), 87)}と粒度から推定した密度

材料名	粒度からの推定					実験結果 ^{86),87)}	
	粒度 評価径 d_c (mm)	推定 最小 間隙比 e_{min}	推定 最大 間隙比 e_{max}	推定 最大 密度 ρ_{dmax} (gr/cm ³)	推定 最小 密度 ρ_{dmin} (gr/cm ³)	最大 密度 ρ_d (gr/cm ³)	最小 密度 ρ_d (gr/cm ³)
A	1.29×10^{-2}	0.392	0.705	1.883	1.536	1.875	1.576
B	4.37×10^{-2}	0.336	0.605	1.961	1.632	1.964	1.533
C	2.45×10^{-2}	0.354	0.637	1.935	1.600	1.984	1.577
D	1.36×10^{-2}	0.383	0.689	1.895	1.551	2.027	1.559
E	1.10×10^{-2}	0.388	0.698	1.910	1.561	1.82	1.49
F	3.27×10^{-3}	0.419	0.753	1.868	1.511	1.77	1.45

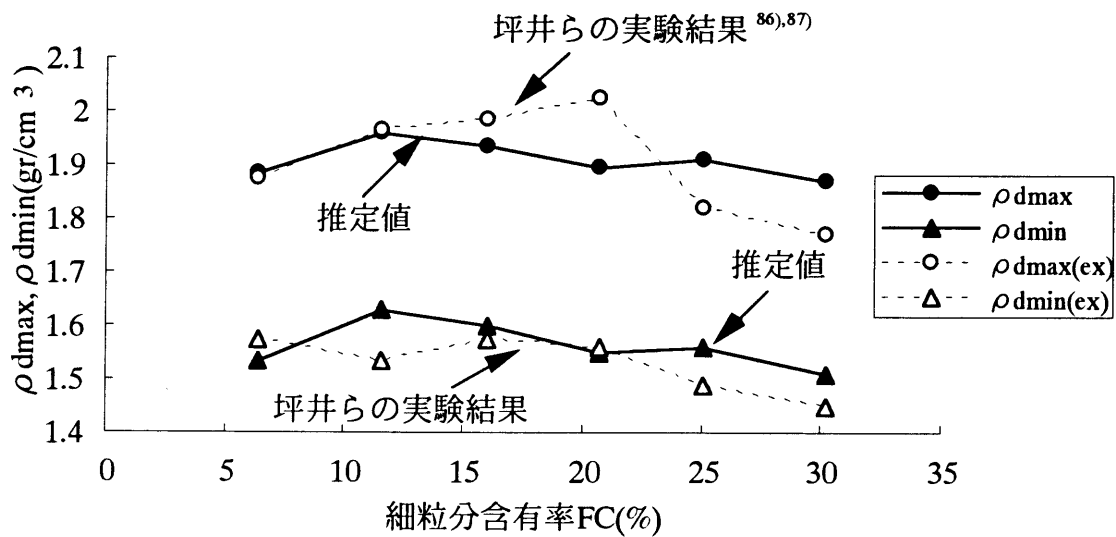


図-2.6.10 坪井らの実験データ^{86), 87)}と推定値の比較

図では点線が坪井らの実験結果、実線は粒度分布から推定した値であり、推定値は実験結果の傾向に類似している。

2.7 むすび

本章では、土質力学分野で従来から一般的である質量基準の粒度分布をもとに個数基準の粒度分布の代表値を誘導する方法を示した。土の力学的挙動は幾何学的形状に影響されるが、これには質量割合よりも個数表示の粒度分布が直接的に関係している。このため、個数基準の粒度分布の代表値を用いて平均間隙径深をモデル化し、物理的意味、内部摩擦角 ϕ' および透水係数や締め固め特性を調べた。この結果以下のことが得られた。

- (1) 個数基準の粒度分布の代表値からモデル化された平均間隙径深 h や平均水膜厚 b は試験結果に対応し、物理的概念が一致する。
- (2) 飽和土の透水係数と平均間隙径深の関係式を導いた。実験結果の比較結果からこの式の適用範囲はHazenやCreager式に比べて広いことを示した。
- (3) 上式を拡張することによって不飽和土の透水係数を導いた。そして、飽和透水係数と不飽和透水係数は平均水膜厚さにも関係していることを示した。
- (4) 内部摩擦角 ϕ' と平均間隙径との関係式を示し、実験値とは $\pm 4^\circ$ の範囲の推定精度をもつことを示した。
- (5) 最大・最小間隙径状態は平均間隙径深に関係していることを実験データを用いて示した。また、これらの整理例では均等係数5~7付近に最小間隙比の最小値が出現することを示した。これらの特徴は実験結果とも対応していることを示した。

参考文献

- 1) 節内寛治：土の粒度分布に関する考察，土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集，pp.51-54，1975.
- 2) 上杉陽：粒径頻度分布からみた風成砂・海成砂の諸特徴，第四紀研究，第11巻，第2号，pp.49-60，1972.
- 3) 岩井重久，松尾新一郎：土の粒度加積曲線に関する統計学的研究，土木学会「土木学会誌」，36-12，pp.32-35，1950.
- 4) 陶野郁雄：砂質堆積物の粒度試験，土質工学会第14回土質工学研究発表会講演概要集，pp.129-132，1970.
- 5) 福田光治：熱田砂層の工学的特性，土質工学会第23回土質工学研究発表会講演概要集，pp.187-188，1987.
- 6) 庄司力偉：堆積学，朝倉書店，pp.178-191，1971.
- 7) 宇梶文雄：フィルダム技術ノート，材料の基本と実際一，日刊工業新聞社，p.51，1980.

- 8) 川北公夫, 小林真純, 種谷真一: 粉体工学(基礎編), 槇書店, p.61, 1974.
- 9) 川北公夫, 小林真純, 種谷真一: 粉体工学(基礎編), 槇書店, p.52, 1974.
- 10) 妹尾学: 土壌水エネルギー指数pFによる土壌構造の考察, 農土論集14, pp.11-15, 1965.(土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版, pp.216-226, 1979.)
- 11) Schofield, R. K: Ionic forces in thick films of liquid between charged surfaces, *Trans. Faraday Soc.* 44 B, PP.219-228, 1946.(土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版, pp.216-226, 1979.)
- 12) 宇野尚雄, 杉井俊夫, 神谷浩二: 比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.25-34, 1993.
- 13) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄: 土質工学叢書2「透水-設計へのアプローチ」, 鹿島出版会, pp.75-79, 1975.
- 14) 松尾新一郎, 木暮敬二: 土の透水性に関する一考察, 土質工学会「土と基礎」, No.560, Vol.125, pp.23-29, 1969.
- 15) 宇野尚雄: 透水係数を推定する実験公式について, 土木学会中部支部, 昭和49年研究発表会講演概要集, pp.115-116, 1973.
- 16) 横沢昭人: 土質調査の実際, 理工図書, p17, 1973.
- 17) 三木五三郎, 佐藤剛司, 下田一雄: 瞬結性薬液の地盤噴射注入機構に関するモールド実験, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1657-1661, 1980.
- 18) 黒田輝光, 木村洋行: 砂地盤におけるトンネルの施工計測解析, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1557-1560, 1980.
- 19) 松尾新一郎, 島重章: マサ土表層の浸透破壊に関する基礎的研究, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1149-1152, 1980.
- 20) 山上拓男: クイックサンド現象に関する実験考察, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1133-1136, 1980.
- 21) 林七郎: 地盤の透潤特性に関する考察(その2), 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.197-202, 1980.
- 22) 河野伊一郎, 西垣誠: 不飽和砂質土の浸透特性に関する実験研究, 土木学会論文報告集, 第307, pp.59-69, 1981.
- 23) 西尾仁応, 小島孝之: 深谷ダム高含水コアの強制乾燥工法について, 日本ダム協会, ダム施工実例集(II), 1972.
- 24) 吉田正: 奥清津発電所の計画と施工, 日本ダム協会, ダム施工実例集(II), p.95, 1972.
- 25) 土壌物理研究会編: 土の物理学—土質工学の基礎—, 森北出版, pp.216-226, 1979.
- 26) 松尾新一郎, 河野伊一郎: 地下水位低下工法, 鹿島出版会, p.12, 1969.
- 27) Jacob Bear: “Dynamics of Fluids in Porous Media”, American Elsevier Publishing

Company, Inc., p.492, 1972.

- 28) 久保田敬一, 河野伊一郎, 宇野尚雄: 土質工学叢書2「透水-設計へのアプローチ」, 鹿島出版会, pp.75-79, 1975.
- 29) 最上武雄: 粒状体の力学, 土木学会監修, 最上武雄編「土質力学」, 技報堂, p.1029, 1969.
- 30) 宇梶文夫編: フィルダム技術ノート, 日刊工業新聞社, p.62, 1980.
- 31) 諸戸靖史: 粒状体の変形と強度に関する基礎的研究, 東北大学博士学位申請論文, pp.72-83, 1976.
- 32) 諸戸靖史: k - e min図による砂礫の工学的分類, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.291-294, 1976.
- 33) Albert Caquot, Jean Kerisl, (藤田亀太郎・最上武雄監訳): カコー・ケリーゼルの土質力, 技報堂, p.171, 1975.
- 34) 松井家孝, 丹沢富彦, 叢昌史: フィルダム土質材料のねじりせん断試験, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1029-1032, 1976.
- 35) 川上浩, 阿部広史, 岩崎公俊: サクションが土の強度におよぼす影響, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.331-334, 1977.
- 36) 酒見徳行, 鎌田正孝, 石井武美, 栗原明美: 粗粒材の大型巾型三軸圧縮試験結果の比較, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.357-360, 1977.
- 37) 川本眺万, 加島章, 門田俊一, 日野和人: フィル材のせん断特性について, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.365-368, 1977.
- 38) 松尾稔, 行友浩, 村山哲夫: 鉋サイの大型せん断特性について, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.381-386, 1977.
- 39) 草野郁, 須長誠: 液状化試験結果の地盤への適用法—平均主応力一定くり返し三軸試験, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.405-408, 1977.
- 40) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 吉田精一: 試料作製法等が砂のせん断変形係数に与える影響, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.409-412, 1977.
- 41) 岸田陸夫, 吉田吉昭, 植木一志: 砂と金属材料との間の摩擦抵抗(その2)(摩擦力~変位関係および摩擦時の砂の体積変化), 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.437-440, 1978.
- 42) 神埼靖, 中崎英彦, 青木隆: 軟岩ロックフィル材料のクリープ特性について, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.457-460, 1978.
- 43) 梅原靖文, 善功企, 浜田浩二: 飽和砂の液状化強さと静的性質の相関性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.529-532, 1978.
- 44) 石原研而, 古賀一美, 坂本雅男, 安田進: 多摩ニュータウンに分布する稲城砂および粘性土のある動的性質, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.589-592, 1978.

- 45) 山内豊聡, 後藤恵之輔, 池永敏明: シラスの擁壁土特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.857-860, 1978.
- 46) 瀬古隆三, 戸部兼雄, 十枝雄三, 高橋反雄: 新型サンドプラー摂取試料と乱した試料の静的及び振動三軸試験結果の比較, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.33-36, 1978.
- 47) 福井正美, 釜江克宏, 瀬古隆三, 石川浩次, 坂本晃司: 洪積砂質土の不攪乱試料採取とその強度特性, 土質工学会第14回土質工学研究発表会講演概要集, pp.353-356, 1979.
- 48) 板橋一雄, 植下協: 乱さない砂の力学的特性について, 土質工学会第14回土質工学研究発表会講演概要集, pp.853-856, 1979.
- 49) 谷元正敏, 橋本信, 田中昌明: 粘性土と砂質土を盛土材料とする混合盛土地盤の強度特性について, 土質工学会第14回土質工学研究発表会講演概要集, pp.853-856, 1979.
- 50) 東田淳, 堀田清美, 篠崎亘: 埋設されたヒューム管に加わる土圧とヒューム管の強度特性について, 土質工学会第14回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1549-1552, 1979.
- 51) 矢野弘一郎, 新舎博, 山内豊聡: ぼたの海原埋立土材としての利用について, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.153-156, 1980.
- 52) 板橋一雄, 宇井之朗: 乱さない熱田砂の力学的異方性について, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.341-344, 1980.
- 53) 深井良一, 太田秀樹, 尾上一馬, 畠昭治郎: Ko状態にある砂の変形強度特性, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.385-388, 1980.
- 54) 西垣好彦, 三木幸蔵, 池尻勝俊: 天満砂レキ層の強度特性について, 土質工学会第15回土質工学研究発表会講演概要集, pp.505-508, 1980.
- 55) 風間秀彦, 小松泰樹, 桧佐哲夫: 稲城砂の土質工学的特性, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.39-40, 1976.
- 56) 赤司六哉, 高田真, 相場明: ロック材料の粒子着色による三軸圧縮試験結果について, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.9-10, 1976.
- 57) 宮森建樹: 粒度分布が砂の最大最小密度および最小密度に及ぼす影響について, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.141-144, 1978.
- 58) 藤本廣, 横田漠: 乱したシラスの動的変形特性(第1報), 土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集, pp.277-280, 1975.
- 59) 石原研而, 山田恭史, 北川久雄: 三主応力を変化させた砂のせん断特性, 土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集, pp.161-164, 1975.
- 60) 今井五郎, 川原靖雄: 砂の圧縮特性と液状化強度の関係, 土質工学会第10回土質工学発表会講演概要集, pp.333-336, 1975.
- 61) 小田匡寛, 風間秀彦, 榎本明: 砂質地盤の異方性について(1), 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.121-124, 1976.

- 62) 八木則男, 西田義親, 矢内久孝: 砂の一次元圧縮について, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.187-190, 1976.
- 63) 山内豊聡, 松田滋, 一瀬久志: 繰返しネジ三軸試験によるシラスの液状化について, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.327-330, 1976.
- 64) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 吉田精一: 砂の動的変形特性に及ぼす粒度分布の影響, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.343-346, 1976.
- 65) 畑中宗憲, 大岡弘: 凍結法による飽和資料摂取の際の凍結の影響について, 土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集, pp.897-900, 1976.
- 66) 石沢正俊, 中川誠志, 黒原一郎: 細粒分を含んだ不攪乱試料の液状化試験, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.397-400, 1977.
- 67) 原田次夫, 打田靖夫, 大長昭雄: 大型単純セン断型液状化試験機の開発と液状化実験例, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.401-404, 1977
- 68) 沢田健吉, 古賀泰之, 間三男: 砂質土の繰返しセン断特性に及ぼす初期セン断, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.425-428, 1977.
- 69) 川辺一洋, 青木雄二郎, 柴崎富士夫: 砂質土における模型杭の引抜き性状に関する実験, 土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp.725-728, 1977.
- 70) 荻野弘雅, 今井五郎, 柴崎博: 飽和砂の液状化に及ぼす平均粒径・均等係数の影響, 土質工学会第9回土質工学研究発表会講演概要集, pp.371-374, 1974.
- 71) 矢野弘一郎, 今井五郎, 川原靖惟: 三軸試験における砂の接線弾性係数, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.417-420, 1978.
- 72) 徳江俊秀, 北原義浩: 上下振動下での乾燥砂礫材の動的破壊・変形特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.493-496, 1978.
- 73) 塩見哲, 成瀬恵一: 破壊近くの砂の動的特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.505-508, 1978.
- 74) 大原資生, 山本哲朗: 砂質土の液化に関する2, 3の考察, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.525-528, 1978.
- 75) 梅原靖文, 善功企, 浜田浩二: 飽和砂の液状化強さと静的性質の相関性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.529-532, 1978.
- 76) 社本康弘, 吉見吉昭, 石井雄輔: 繰返しセン断履歴をうけた飽和砂の液状化抵抗, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.533-536, 1978.
- 77) 沢田健吉, 古賀泰之, 館山悟: 河床砂レキの液状化特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.537-540, 1978.
- 78) 草野郁, 小川女子: 細粒分を含む沖積砂の液状化特性一過圧密くり返しセン断履歴が液状化強さに及ぼす影響, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.541-544, 1978.
- 79) 林七郎, 小川保, 半田治, 安岡進: 締固めたマサ土の液状化特性, 土質工学会

- 第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.597-600, 1978.
- 80) 山内豊聡, 後藤恵之輔, 池永敏明: シラスの擁壁土圧特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.857-860, 1978.
 - 81) 桑山忠, 植下協: 土質分類と工学的性質との対応について, 土木学会第27回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.557-560, 1972.
 - 82) 李弘揆: 礫質土の締固めの特性とその強度に関する研究, 名古屋大学博士学位申請論文, pp.141-143, 1995.
 - 83) 土質工学会編: 土質試験の方法と解説, 第5編第1章突き固めによる土の締固め試験, 土質工学会, pp.201-204, 1991.
 - 84) 青山千家, 遠山茂行, 荒木繁幸, 西田一彦: 乱さないマサ土の透水係数, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.157-160, 1978.
 - 85) 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, 京都大学博士学位申請論文, pp.61-76, 1959.
 - 86) 坪井秀夫, 本郷陸夫, 奥田真也, 松本淳之介, 中角功: 地盤改良使用砂の細粒分含有率が及ぼす土質特性への影響, 土質工学会「土の判別と工学的分類に関するシンポジウム」発表論文集, pp.129-134, 1993.
 - 87) 坪井秀夫, 神田善夫, 奥田真也, 松本淳之介, 中角功, 本郷陸夫: 地盤改良使用砂の細粒分含有率の影響に関する試験結果, 土木学会第48回年次学術講演会概要集第IV集, pp.572-573, 1994.

第3章 日本統一土質分類法の構造と 粒度評価径法の研究

3.1 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_e 、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、この分類方法の構成要因である分類名と土質工学的諸性質の定量的関連性は必ずしも明確な根拠はもっていないわけではない。このことは初心者・未経験者が日本統一土質分類法の分類名によって土質特性を推定することを困難にしている。

本研究では、土質分類方法の定量化をめざして粒度分布を基礎にした土質分類方法として、ひとつのフラクションとしての新しい分類名を定義するのではなく、粒度分布から得られる一個の指標となる連続した数値であらわす方法を示した。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 ϕ' 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。

本章では前章で示した一連の基礎的研究^{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解析を行った結果を示している。特に日本統一土質分類法の確立においてはCBR特性の研究が重要な役割を果たしているため、これらの分析を介して粒度評価径法が、過去の集大成された知見を包含していることを示した。

本章の構成を図-3.1.1に示す。本章の基本的内容は粒度評価径法の提案と基礎的な応用例を示し、その有効性を確認することである。

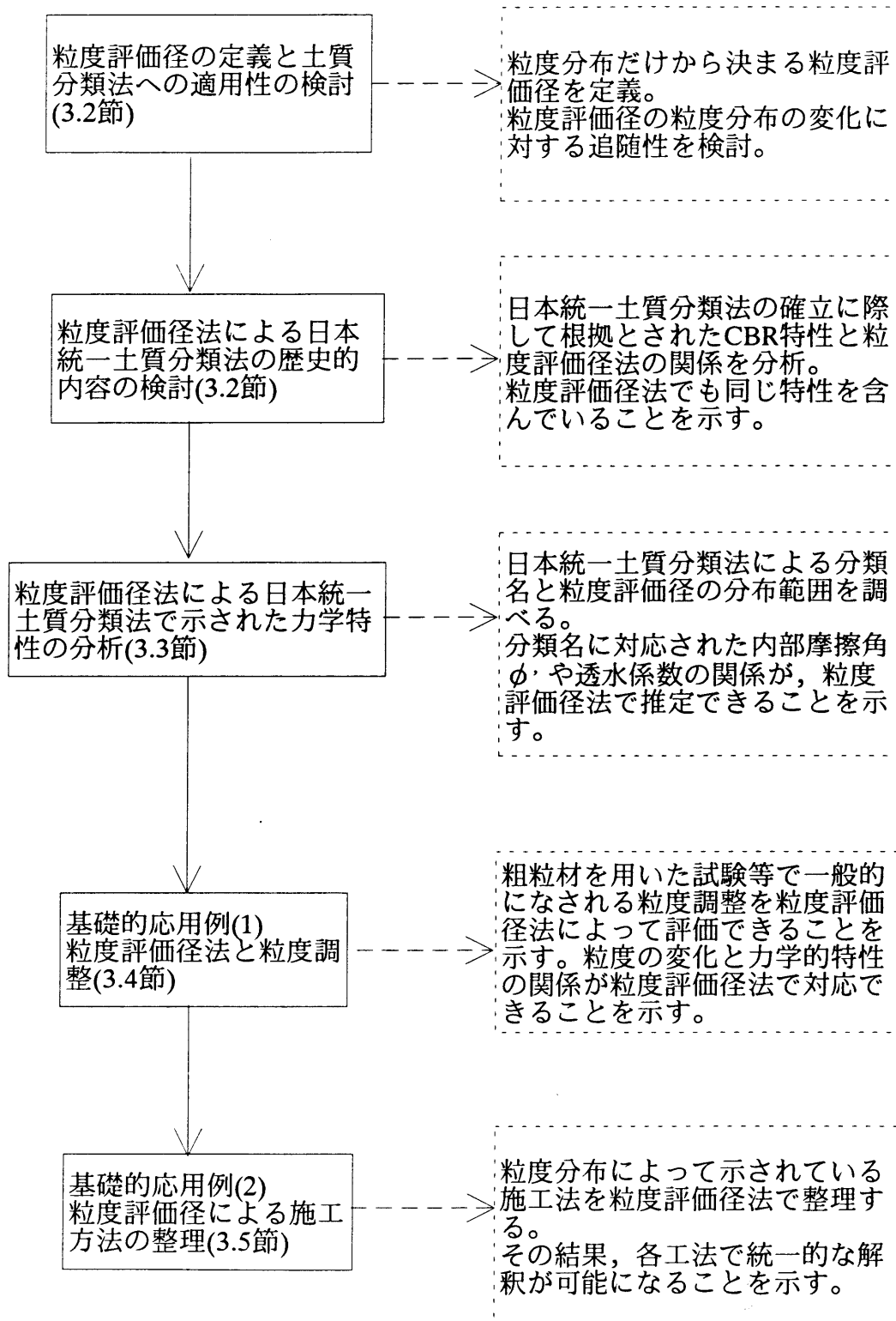


図-3.1.1 本章の構成

3.2 粒度評価径法と土質分類

3.2.1 粒度特性を示す粒度評価径の定義

前章までに、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平均間隙径深 h (mm), 平均水膜厚 b (mm)を提案した³⁾。これらの式を整理して示したのが式 (3.2.1) ~ (3.2.4) であり、今後の基本式になる。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。

$$h = \frac{0.3d_{50}}{\exp \{0.5 (0.484 + 0.420 \ell n U_c)^2\}} \cdot \frac{e}{G_s} \quad (3.2.1)$$

$$b = \frac{0.3d_{50}}{\exp \{0.5 (0.484 + 0.420 \ell n U_c)^2\}} \cdot w \quad (3.2.2)$$

$$\ell \log k = 2.87 (1 + \ell \log h) \quad (3.2.3)$$

$$\tan \phi' \doteq 0.85 \frac{d_{10}^{0.09}}{h^{0.02}} \quad (3.2.4)$$

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) k : 透水係数(cm/s), ϕ' : 有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' (°), h : 平均間隙径深(mm), b : 平均水膜厚(mm)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(3.2.1)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、2章では式(3.2.1), (3.2.2)をもとに、透水係数 k や内部摩擦角 ϕ' との力学的関連を研究し、式(3.2.3), (3.2.4)で示される近似的な関係式を示した^{4)~6)}。式(3.2.3)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(3.2.4)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(3.2.1), (3.2.2)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 k と有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' が推定できるので、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(3.2.1), (3.2.2)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(3.2.5)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。すると式(3.2.6), (3.2.7)で平均間隙径深 h , 平均水膜厚 b が求められる。

$$d_c = \frac{0.3d_{50}}{\exp\{0.5(0.484 + 0.420 \ln U_c)^2\}} \quad (3.2.5)$$

$$h = d_c \frac{e}{G_s} \quad (3.2.6)$$

$$b = d_c \cdot w \quad (3.2.7)$$

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 ϕ' を概略的に推定することが可能となる。この意味で式(3.2.5)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⁾や福本⁹⁾、板橋ら¹⁰⁾の研究に見られる。彼らはまさ土等の粒子破碎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色は工学的特性により密接に関係させていることである。

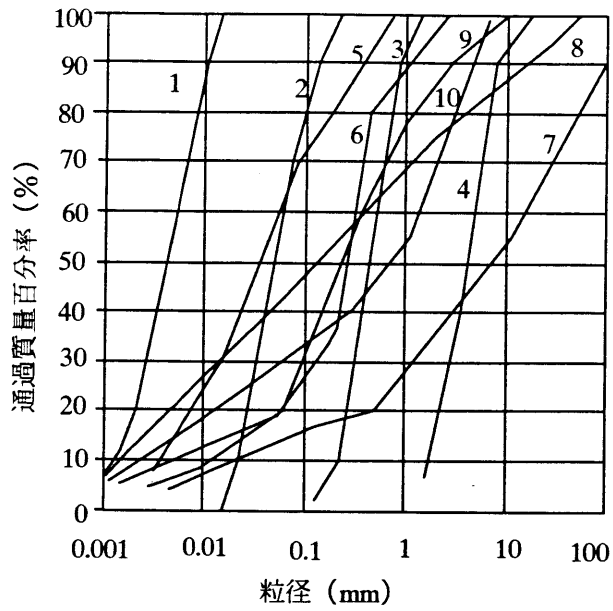
3.2.2 粒度評価径法と粒度分布

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。

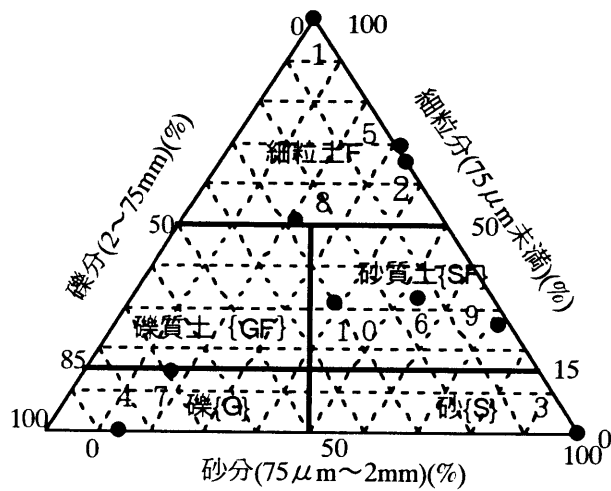
(1) 日本統一土質分類と粒度評価径法の類似性

図-3.2.1(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するため10%粒径 d_{10} が $1\mu\text{m}$ 以上の場合である。

図-3.2.1(b)は、図-3.2.1(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。



(a) 粒径加積曲線



(b) 三角分類

図-3.2.1 粒径加積曲線と三角座標分類

表-3.2.1, 図-3.2.2は図-3.2.1で示された粒度分布を粒度評価径 d_c との関係で整理した結果である。なお, 図-3.2.2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ことがわかる。

表-3.2.1 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^{-4}	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}

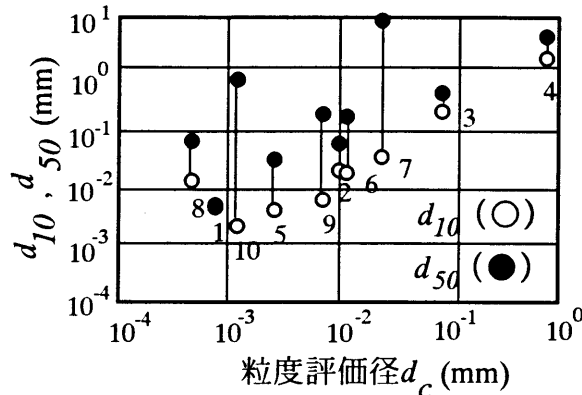


図-3.2.2 粒度評価径と d_{10} , d_{50} との関係

図-3.2.1(a)に示した10試料の三角座標上の位置関係と、図-3.2.2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 d_c 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 d_c 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 d_c 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、粒度評価径 d_c によって粗粒土、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 10^{-3} , 10^{-4} (mm)の粒度評価径が対応し、{SF}, {G} の試料の粒度評価径 d_c は 10^{-3} (mm)以上になり、また {SF} よりも {G} の値が大きいことから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-3.2.1から得られる工学的イメージと図-3.2.2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 U_c 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 U_c が大きいNo.5~No.10の場合はこの傾向は異なってくる。図-3.2.1(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-3.2.2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-3.2.2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-3.2.1, 3.2.2の位置的関係の検討結果では、均等係数 U_c 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的關係は類似した関係を与えており、粒度評価径 d_c 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 U_c が大きくなると三角座標分類と粒度評価径 d_c 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。

3.2.3 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、

$$\text{「粒度がよい」 } U_c \geq 10, 1 < U_c' < \sqrt{U_c}$$

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、

$$\text{粒度がよい礫 } U_c \geq 4, 1 < U_c' < 3$$

$$\text{粒度がよい砂 } U_c \geq 6, 1 < U_c' < 3$$

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貫入時の値を用いた。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ヶの試験結果である。

図-3.2.3は細粒分含有率と簡易CBRの関係を示している。

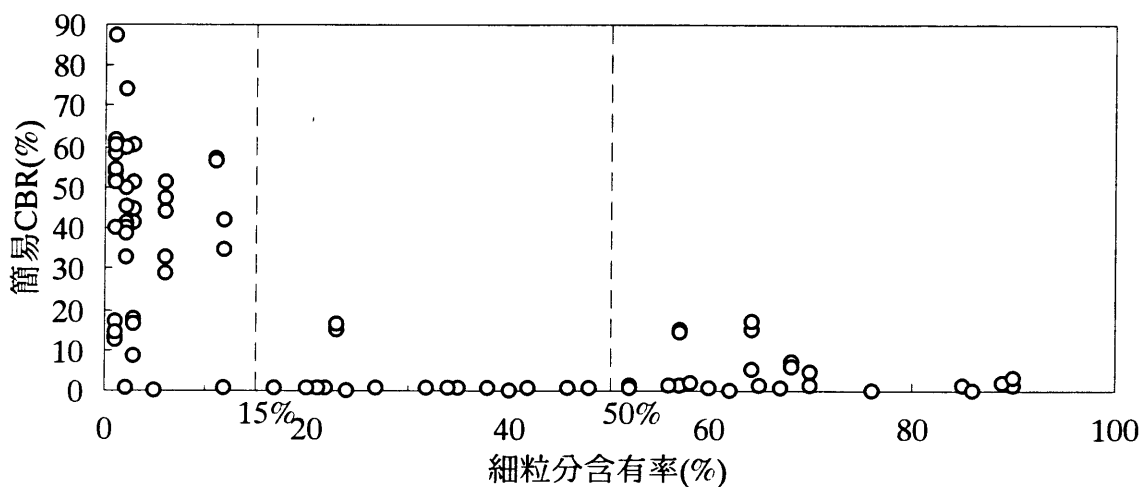


図-3.2.3 細粒分含有率と簡易CBRの関係

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、ばらつきは顕著に小さくなる。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-3.2.4は同じデータを用いて均等係数 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。

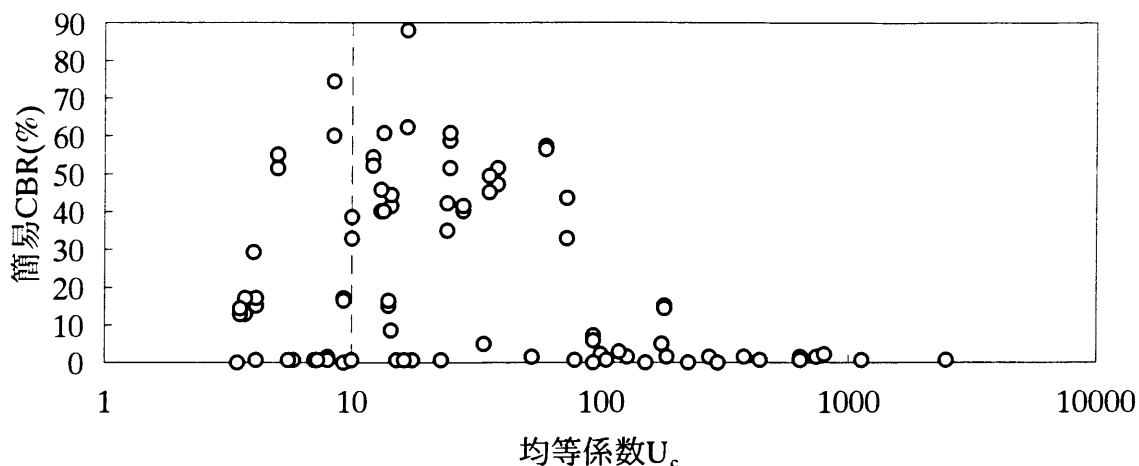


図-3.2.4 均等係数と簡易CBRのばらつき

図-3.2.4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-3.2.4ではばらつきが小さくなり、必ずしも均等係数 U_c 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-3.2.5は図-3.2.3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-3.2.3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、粒度評価径 $d_c \geq 10^2(\text{mm})$ 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。 $d_c = 10^3 \sim 10^2(\text{mm})$ のデータが少ないが、 $d_c \leq 10^3(\text{mm})$ 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になり、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 $d_c = 10^2(\text{mm})$ は植下らが示した細粒分15%に、粒度評価径 $d_c = 10^3(\text{mm})$ 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、 $10^2 < d_c < 10^3(\text{mm})$ の範囲は遷移領域にあたる。

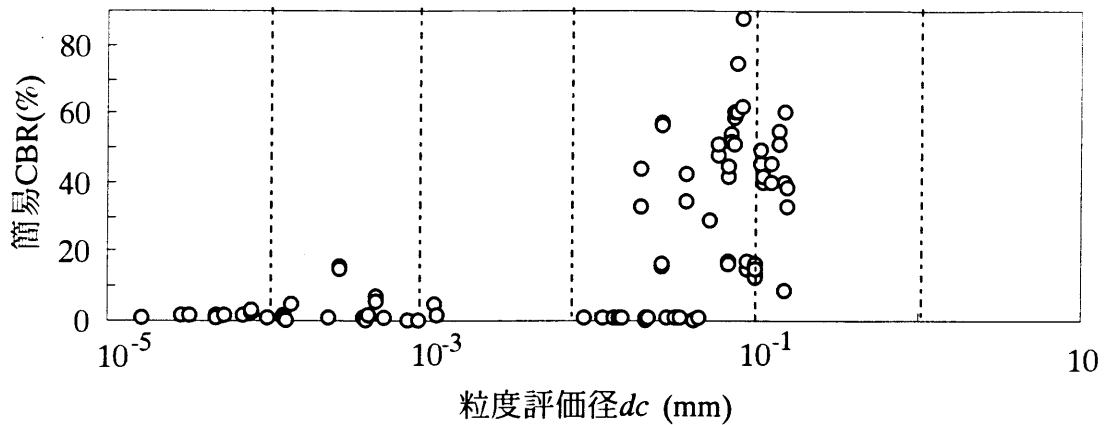


図-3.2.5 粒度評価径と簡易CBR

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-3.2.6である。この図は図-3.2.5と同じデータに基づいて、その横座標は、対数で0.2毎に区分されている。図-3.2.6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データは粒度評価径 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。

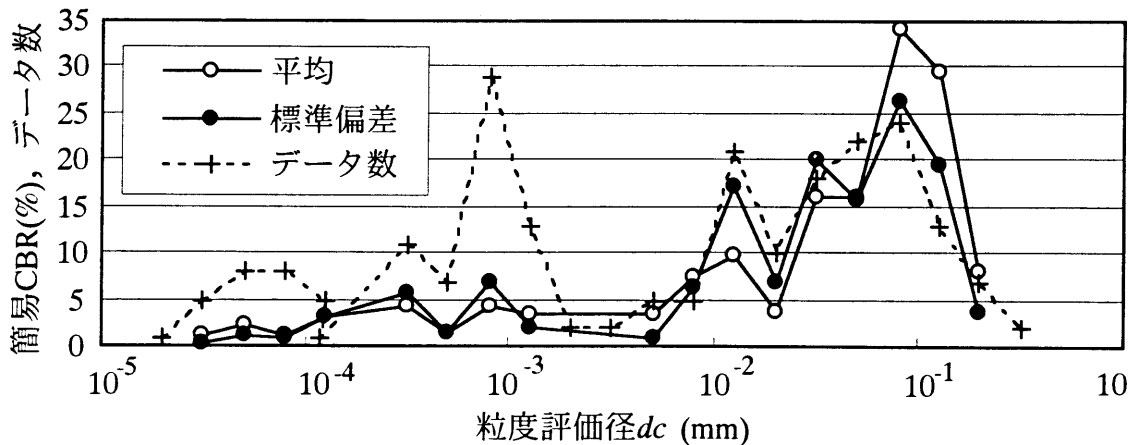


図-3.2.6 粒度評価径と簡易CBRの特徴

図-3.2.3～3.2.6の検討結果として次の2点を得られ、粒度評価径 $d_c = 10^{-2}, 10^{-3}$ (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。

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-3.2.8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。しかも連続量である1個の粒度評価径 d_c でCBR特性がある程度区分できることは、細粒分含有率、均等係数 U_c 、曲率係数 U_c' を考慮した従来の方法に比べて簡便な分類方法として位置づけることができる。

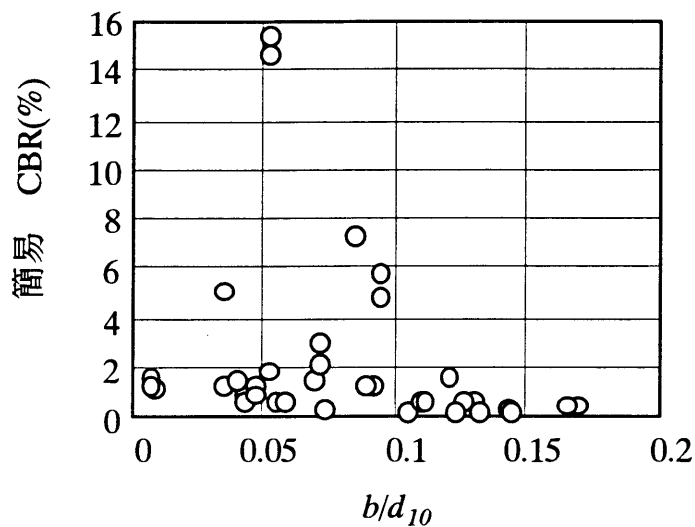


図-3.2.8 粒度評価径 10^{-2} (mm)以下の簡易CBR

3.3 日本統一土質分類法と力学特性の分析

3.3.1 粒度評価径法による日本統一土質分類法の構造

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。このことが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・未経験者にはなかなか会得し難い原因の一つになっていると考えられる。また、土質基礎の設計では、粘性土と砂質土の設計体系は非常に異なって示されているが、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対応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に関連させて示されている内部摩擦角 ϕ' と透水係数 k の範囲と、粒度評価径法によって推定される値の範囲がどのように対応するかを調べる。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10%粒径 d_{10} が $d_{10} < 0.001\text{mm}$ となり、10%粒径 d_{10} が求まらないデータもあるが、この場合、図-3.3.1、式(3.3.1)に示すように粒度分布を滑らかに外推し10%通過率との交点により10%粒径 d_{10} を推定した。

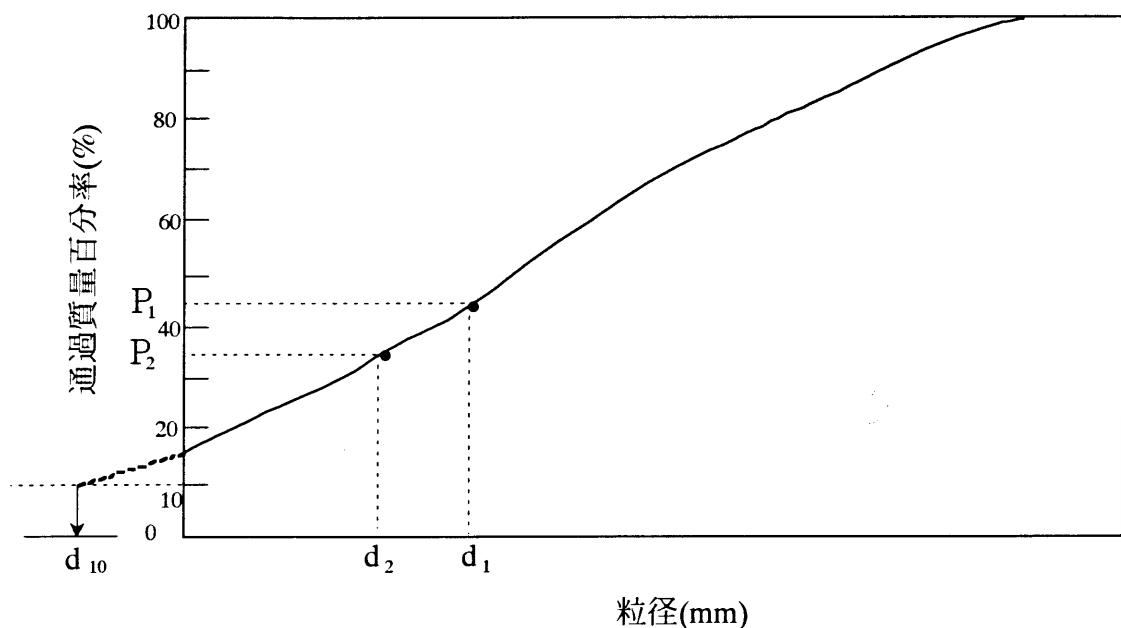


図-3.3.1 細粒土の10% 粒径の推定方法

この場合比重浮標による最後の読値の精度が問題になるので、この点を除いた直上の2つデータを外捜する方法をとった。

$$\ell \log d_{10} = \ell \log d_2 - \frac{P_2 - 10}{P_1 - P_2} \cdot \ell \log \frac{d_1}{d_2} \quad (3.3.1)$$

図-3.3.2～4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。図-3.3.4は全体のデータを整理している。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いえる。

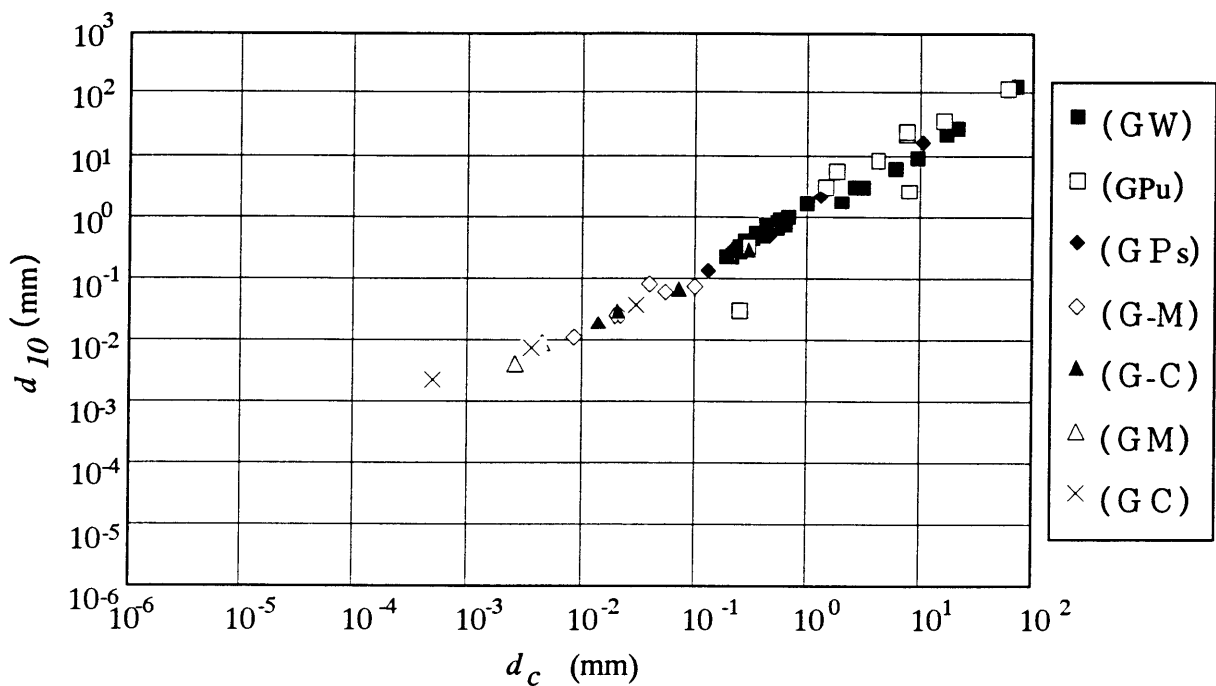


図-3.3.2 粒度評価径と統一土質分類法による分類名 (1)

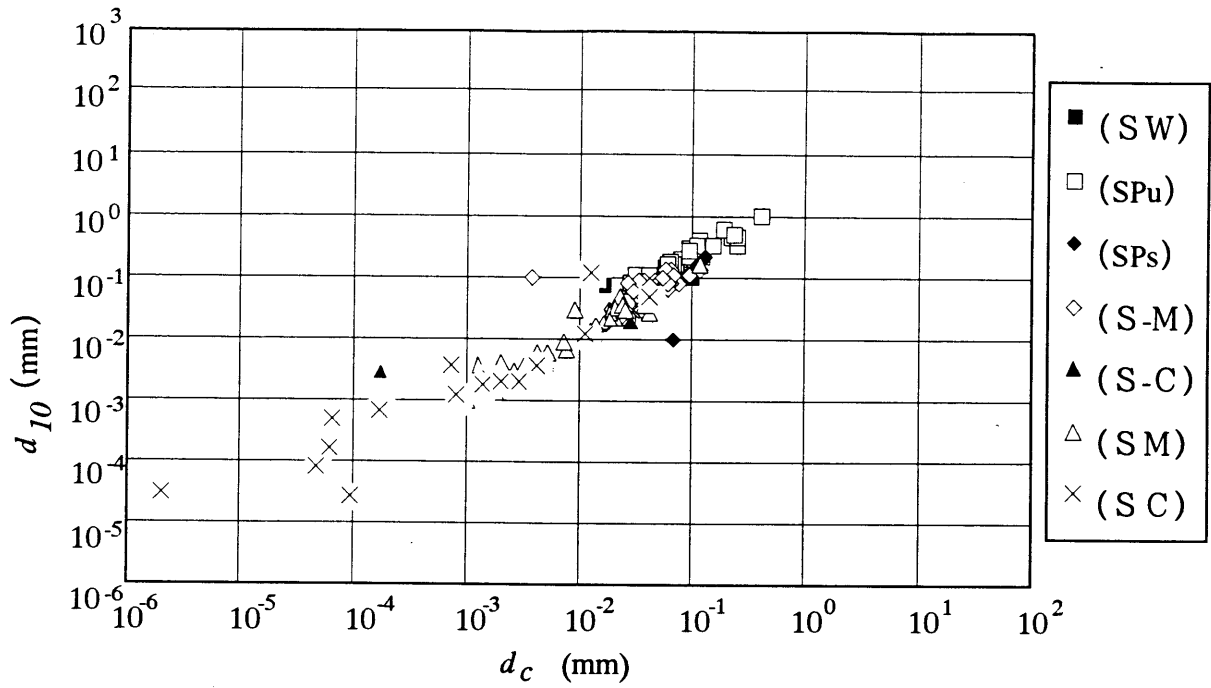


図-3.3.3 粒度評価径と日本統一土質分類法による分類名 (2)

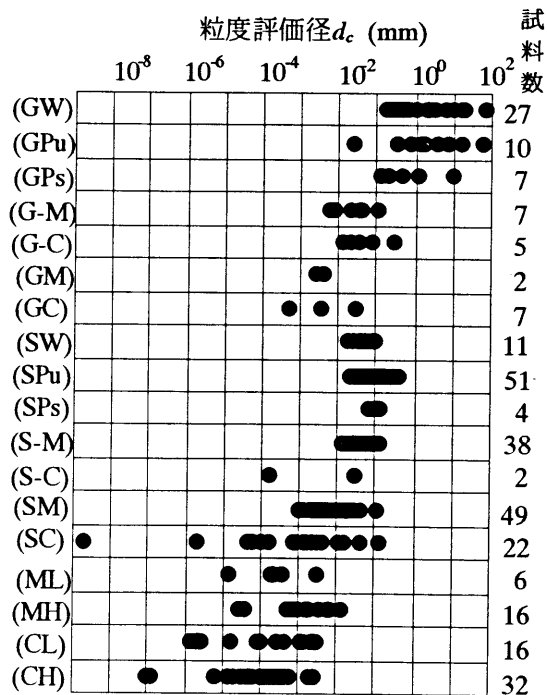


図-3.3.4 粒度評価径と日本統一土質分類名

収集したデータは試料総数312ケで、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。しかし、傾向的には、粒度評価径 d_c 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 d_c 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 d_c 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られる。

以下に代表的な分類名の特徴を列記する。

(1) (GW)

粒度評価径 $d_c \geq 2 \times 10^1$ (mm)にあり、粒度評価径 d_c が大きくなるに従い急激に出現頻度が減少している。粒度評価径 d_c の上限値は図では $d_c < 1 \times 10^2$ (mm)であるが、分類の基準として粒径の上限値の規定がなく、従って、粒度評価径 d_c の上限もそれに対応し大きくなる可能性がある。つまり (GW) は $d_c \geq 1.8 \times 10^1$ (mm)のように下限値で示される。

(2) (GP)

出現頻度は一様分布のようであり、最頻値はみられない。粒度評価径 d_c の範囲として $2 \times 10^2 \leq d_c < 1 \times 10^2$ (mm)、特に $1 \times 10^1 < d_c < 1 \times 10^2$ (mm)である。このうち下限値については 10^2 のオーダーのデータは1点で、傾向的には $d_c \geq 1 \times 10^1$ (mm)と考えられる。上限値については (GW) の考察と同様粒径により $d_c > 1 \times 10^2$ (mm)の可能性も残されており、分類として (GP) は $d_c \geq 1 \times 10^1$ (mm)とする方が妥当であろう。

(3) (SW)

$1 \times 10^2 \leq d_c \leq 1 \times 10^1$ (mm)で、比較的狭い範囲に集中しているのが特徴である。

(4) (S-M)

主として $1 \times 10^2 \leq d_c < 1 \times 10^1$ (mm)に分布している。図には (S-C) の試料もプロットして対比しているが、(S-M) に比べ数オーダー小さい粒度評価径 d_c の傾向を示している。

(5) (SM)

$1 \times 10^3 \leq d_c < 5 \times 10^1$ (mm)の範囲に分布している。上限値として 10^1 (mm)以上の粒度評価径 d_c が一点あるがデータとしては少ないと考えられる。

(6) (SC)

$d_c < 10^3$ (mm)の粒度評価径 d_c もあり、粒度評価径 d_c の頻度に若干検討を要する点もあるが、 $10^5 \sim 10^2$ (mm)と非常に広範囲に分布しており複雑な土質特性が予想される。

(7) (MH), (ML)

データ数が少なく、しかも、大部分10%粒径 d_{10} が推定値であり検討を要するが、 $1 \times 10^5 < d_c < 1 \times 10^2$ (mm)の範囲にある。

(8) (CH), (CL)

データ数が少なく、しかも、大部分10%粒径 d_{10} が推定値であり検討を要するが、 $1 \times 10^5 < d_c < 5 \times 10^3$ (mm)の範囲にある。このうち (CL) は (CH) よりも

若干大きな粒度評価径 d_c であり、 $1 \times 10^{-5} < d_c < 1 \times 10^{-3}(\text{mm})$ に分布している。また(MH)、(ML)に比べて(CH)、(CL)の粒度評価径 d_c は全体的に小さい。

3.3.2 日本統一土質分類法と力学特性

前章で日本統一土質分類法と粒度評価径法との関係进行分析し、その中で分類名に対応する粒度評価径 d_c の範囲を示した。この節では、飽和時の透水係数 k と有効応力表示の内部摩擦角 ϕ' をとりあげ、フィルダムで提案されている土質分類に与えられた力学特性¹⁷⁾の分布範囲を判定基準にして、分類名に対応させた粒度評価径 d_c から推定した力学諸量の推定値の乖離状態によって粒度評価径法の精度を検討した。計算結果を整理したのが表-3.3.1である。粒度評価径の範囲は図-3.3.2～3.3.4から求めた。透水係数 k 、内部摩擦角 ϕ' は式(3.2.1)～(3.2.4)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-3.3.5は表-3.3.1の結果を図化したものである。図によると(SW)の内部摩擦角 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径法は包含できることを示している。

表-3.3.1 土質特性の比較

	粒度評価径の範囲			文献 17)			** d 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	$1 \times 10^{-3} \sim$ 1×10^{-1}	38 3×10^{-2}	40 2×10^{-1}	47 $>10^0$
(GP)	1×10^{-1}	4×10^{-1}	1×10^2	*(0.37)	>36	$5 \times 10^{-4} \sim$ 5×10^{-2}	37 4×10^{-3}	40 2×10^{-1}	47 $>10^0$
(SW)	1×10^{-2}	4×10^{-2}	1×10^{-1}	$0.37 \pm$	38 ± 1	$5 \times 10^{-4} \sim$ 5×10^{-1}	33 5×10^{-6}	35 3×10^{-4}	37 4×10^{-3}
(SP)	2×10^{-2}	1×10^{-1}	5×10^{-1}	0.50 ± 0.03	36 ± 1	$5 \times 10^{-5} \sim$ 5×10^{-1}	34 8×10^{-5}	37 8×10^{-3}	40 9×10^{-1}
(S-M)	1×10^{-2}	4×10^{-2}	1×10^1	0.41 ± 0.02	33 ± 3	—	33 6×10^{-6}	35 3×10^{-4}	37 5×10^{-3}
(SM)	1×10^{-3}	1×10^{-2}	5×10^{-2}	0.48 ± 0.02	34 ± 1	$1 \times 10^{-7} \sim$ 5×10^{-5}	29 1×10^{-8}	33 1×10^{-5}	36 1×10^{-3}
(SC)	5×10^{-5}	1×10^{-3}	5×10^{-2}	0.48 ± 0.01	31 ± 3	$1 \times 10^{-8} \sim$ 1×10^{-5}	24 2×10^{-12}	29 1×10^{-8}	36 1×10^{-3}
(CH)	1×10^{-5}	2×10^{-4}	1×10^{-3}	0.80 ± 0.04	19 ± 5	$1 \times 10^{-10} \sim$ 1×10^{-8}	21 1×10^{-13}	26 6×10^{-10}	28 6×10^{-8}
(CL)	1×10^{-4}	5×10^{-4}	5×10^{-3}	0.56 ± 0.01	28 ± 2	$1 \times 10^{-8} \sim$ 1×10^{-6}	25 3×10^{-11}	27 3×10^{-9}	31 2×10^{-6}

* 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

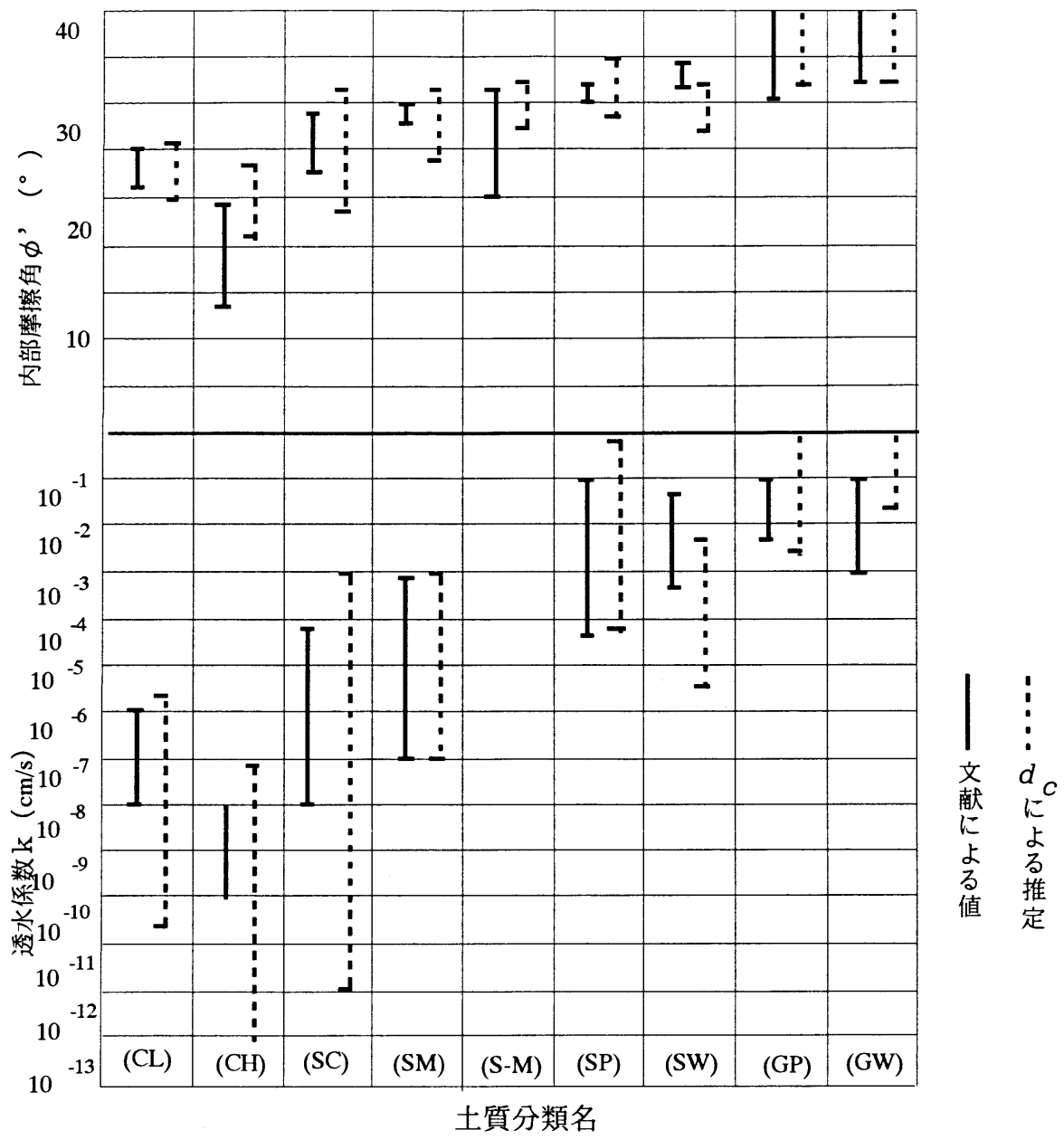


図-3.3.5 粒度評価径法による分類と力学特性

3.4 粒度調整法と粒度評価径法

本章では粒度評価径法の基礎的な応用例として粒度調整をとりあげた。試料に大きな礫が含まれていると、一般に土質試験は困難になり、試験器具に対応した許容粒径以上をカットし、尖頭粒度や相似粒度になるように粒度を調整して試験したり、フィルダム関係ではWalker-Hortzの方法¹⁸⁾や細粒分含有率等が用いられて補正¹⁹⁾されることがある。Pascal分布やTalbotの式も風化過程や締固め度における粒度変化を表わす研究に利用されている^{20), 21)}。しかし、日本統一土質分類法ではこうした問題に対応できないことは明らかである。粒度評価径法はひとつの連続量である指標によって土質分類を行う方法である。このため原材料試験用試料の力学的特性は粒度評価径を介して関連させることができる。また上記に示したWalker-Hortz等の提案式は密度に関するものであり、広範な力学特性は対象にされていない。しかも、これらの基準となるのは与えられた材料の密度であり、異った材料との相対的関連性が示されていない。この意味で、粒度評価径法は有効性を示すと考えられる。本節では内部摩擦角 ϕ' と透水係数 k をとりあげて粒度分布の変化と力学特性の関係における粒度評価径法の役割を検討した。

(1) 尖頭粒度と粗粒材の強度

用いた材料は図-3.4.1に示す粒度分布の風化花崗岩系材料A, B, Cである。表-3.4.1は3材料の材料特性を整理したものである。これらの材料について内径 ϕ 300mm, 高さ h 600mmの大型三軸圧縮試験を実施した。試料は試験器の制約があるため現場で最大粒径50mm以上をカットした尖頭粒度を用いた。このため尖頭粒度の試験結果から粒度分布が異なる原粒度の強度を推定する必要がある。この方法として粗粒材の強度と粒度の関係に式(3.2.4)を適用し、その有効性を確認した上で、この式より原粒度の粒度評価径 d_e を用いて強度を推定する方法を用いた。

図-3.4.2は全国的な粗粒土に対して行なわれた実験結果と、式(3.2.4)による推定結果を比較したものである。間隙比に対する ϕ' は $30^\circ \sim 50^\circ$ でばらついているが、表-3.4.2に示すように式(3.2.4)による推定結果は内部摩擦角 ϕ' の実験結果の傾向をとらえている。このように図から、尖頭粒度の強度も粒度～強度の関係の範囲内にあることがわかる。従って、原粒度の強度も式(3.2.4)に従うとすれば、表-3.4.3に示すように尖頭粒度の強度 $\phi' = 36 \sim 39^\circ$ に対し、原粒度の強度はやや上昇して $\phi' = 38 \sim 39^\circ$ が予想される。この中で材料Bの尖頭粒度の強度が高い理由は、最大粒径をカットしたが、60%粒径 d_{60} より小さい粒径の部分で、原粒度に比べて尖頭粒度がやや粗粒側になっていたためである。

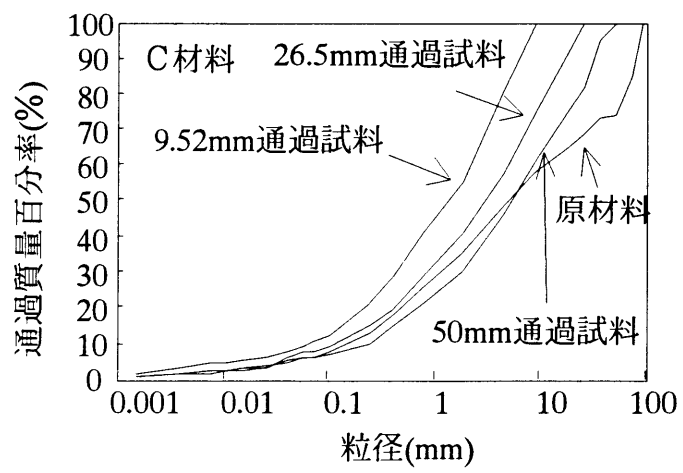
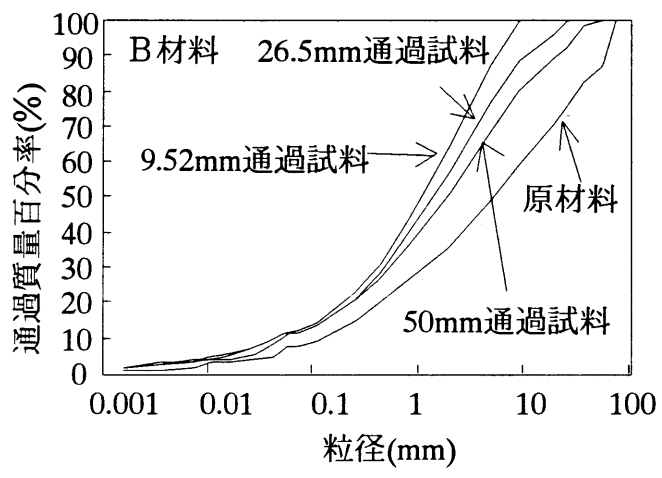
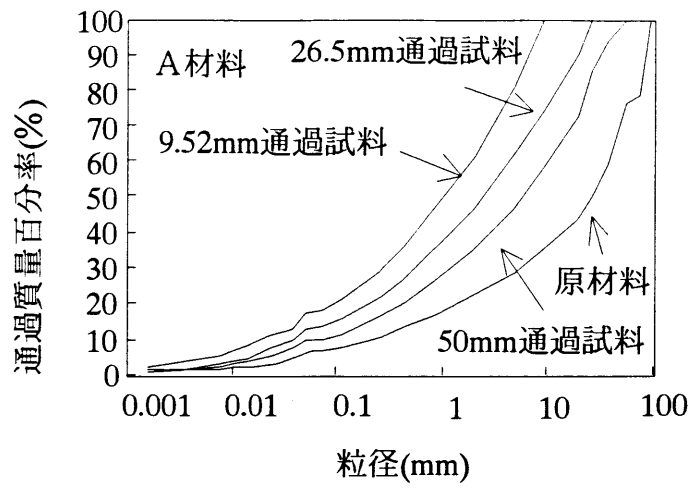


図-3.4.1 粗粒材と室内試験材料の粒度分布

表-3.4.1 材料特性

		粒度試験					比重	含水量
	撮取試料状況	最大粒径 (mm)	D ₆₀ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₁₀ (mm)	U _c	G _s	W (%)
A	現場埋立材料	300	38.4	27.1	0.129	175.4	2.698	2.6
	50mm通過試料	50	10.5	5.826	0.078	134.1	2.698	4.0
	26.5mm通過試料	26.5	4.343	2.392	0.038	114.8	2.717	4.8
	9.52mm通過試料	9.52	1.882	1.026	0.021	91.4	1.691	5.7
B	現場埋立材料	300	9.738	5.010	0.133	73.2	2.708	3.0
	50mm通過試料	50	3.135	1.913	0.056	56.3	2.713	3.5
	26.5mm通過試料	26.5	2.280	1.391	0.047	48.8	2.704	3.8
	9.52mm通過試料	9.52	1.674	1.096	0.047	35.7	2.688	3.9
C	現場埋立材料	300	11.7	5.306	0.171	68.4	2.640	2.3
	50mm通過試料	50	9.151	5.729	0.256	35.8	2.662	3.4
	26.5mm通過試料	26.5	5.253	3.250	0.128	41.0	2.664	2.7
	9.52mm通過試料	9.52	2.360	1.496	0.069	34.5	2.664	3.2

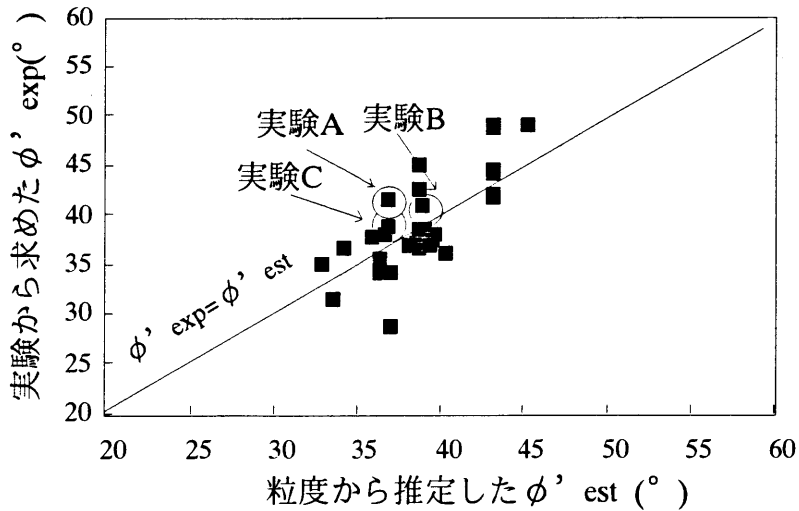


図-3.4.2 粗粒材料の内部摩擦角

表-3.4.2 実験粒度に対する内部摩擦角 ϕ' の粒度

材料		推定 ϕ' (°)	実験 ϕ' (°)	推定値の差
風化花崗岩	実験A	36.9	41.3	-4.4
	実験B	38.9	40.9	-2.0
	実験C	36.0	38.8	-2.8

表-3.4.3 原粒度強度の推定

材料	原材料粒径(mm)				間隙比 e	原材料推定 ϕ' (°)
	d_{60}	d_{50}	d_{10}	U_c		
A	38.400	27.100	0.129	297.7	0.25	38.0
B	9.378	5.010	0.133	70.5	0.35	38.3
C	11.700	5.306	0.171	68.4	0.28	39.0

(2) 試験径と内部摩擦角 ϕ'

試験径を変えた強度試験を行い、この結果から粒度分布の特性を考慮して大礫を含む粗粒土の原材料強度を推定する方法もよく用いられる。実験で用いた試料の粒度を図-3.4.3に示す。ここでは、試験の最大径を $\phi 300$ と $\phi 100$ mmとしてそれに対応する尖頭粒度で調整した試料によって試験を行った。材料特性を表-3.4.4に示す。

表-3.4.4 力学的試験粒度特性

三軸圧縮試験	試料	最大粒径 (mm)	d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	U_c	密度 g/cm^3	間隙比 e
$\phi 300$ mm	1	37.0	13.23	8.2	0.26	50.8	1.5	0.75
	2	42.0	1.93	6.3	0.26	41.3	1.9	0.38
$\phi 100$ mm	1	9.0	2.09	1.3	0.065	32.1	1.5	0.75
	2	9.0	2.69	1.7	0.095	28.8	1.9	0.38

表-3.4.5は表-3.4.4と式(3.2.4)から推定した内部摩擦角 ϕ' と、これに対応する実験結果を比較したものである。

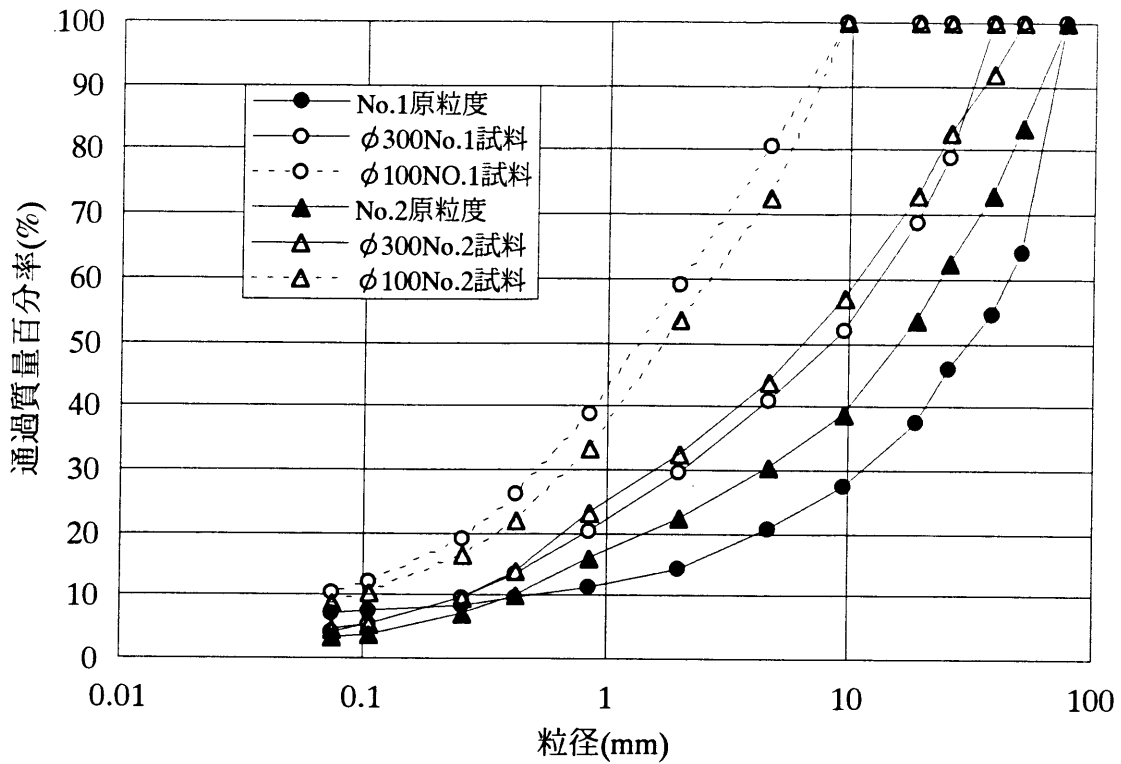


図-3.4.3 力学試験試料粒度特性

表-3.4.5 内部摩擦角 ϕ' の比較

試料名			1		2	
乾燥密度 γd (g/cm ³)	条件		1.5	1.9	1.5	1.9
三軸圧縮試験	φ300 (mm)	推定	38	39	38	39
		実験結果	37.2	38.0	38.4	38.4
	φ100 (mm)	推定	36	36	36	37
		実験結果	37.5	34.3	37.8	34.0

単位 (°)

これらの結果から試験機によって決まる最大粒径以下に調整された粒度特性が、試験結果にも反映されており、この範囲は粒度評価径法によって推定できることを示した。従って、尖頭粒度で調整した試験結果から原材料の強度を評価する場合は、試験試料の粒度分布と原材料の粒度分布の相異性を考慮して補正する必要があり、その方法のひとつ

つとして粒度評価径法が有効であることを示した。

(3) 坪井らの実験結果²²⁾による検証

ここでは坪井らのデータを用いて、文献に示された内部摩擦角 ϕ' と透水係数 k の変化特性と粒度評価径法による推定結果を比較する。材料特性は図-2.6.9、表-2.6.2に示されている。力学試験結果を示したのが表-3.4.6である。表には粒度評価径から推定した結果も示してあるが、各相対密度に対して比較したのが図-3.4.4~3.4.7である。

表-3.4.6 坪井らの実験結果²²⁾と推定値の比較

材料名	粒度からの推定					実験結果 ²²⁾				
	d_c (mm)	Dr=60%		Dr=90%	Dr=85%	透水係数(cm/s)		内部摩擦角 ϕ' (°)		
		ϕ' (°)	k (cm/s)	ϕ' (°)	k (cm/s)	Dr=60%	Dr=85%	Dr=60%	Dr=85%	Dr=90%
A	1.29×10^{-2}	32.8	2.70×10^{-5}	32.9	1.68×10^{-5}	8.09×10^{-3}	1.85×10^{-3}	43.2	43.9	44.8
B	4.37×10^{-2}	35.9	5.69×10^{-4}	36.0	3.55×10^{-4}	1.93×10^{-3}	7.89×10^{-4}	39.5	41.0	43.5
C	2.45×10^{-2}	34.1	1.26×10^{-4}	34.2	7.83×10^{-4}	1.94×10^{-4}	7.68×10^{-5}	36.0	38.5	42.0
D	1.36×10^{-2}	32.9	2.87×10^{-5}	33.0	1.79×10^{-5}	10.0×10^{-5}	4.21×10^{-5}	34.5	38.0	41.8
E	1.10×10^{-2}	32.6	1.57×10^{-5}	32.7	9.78×10^{-5}					
F	3.27×10^{-3}	31.0	6.03×10^{-7}	31.1	3.77×10^{-7}					

推定式の適用にあたっては式(3.2.1)~(3.2.4)及び最大・最小間隙比に関する式(2.6.6), (2.6.7)を用いた。なお、最大・最小間隙比に関する推定結果は表-2.6.3及び図-2.6.10に示した。相対密度 D_r は表-2.6.3の結果を用いて計算した。

図-3.4.4, 3.4.5は細粒分含有率 $FC > 10\%$ の領域における透水係数 k に関して、推定値は2つの相対密度に対する実験値によく対応しており、細粒分が増加すると透水係数 k は小さくなる傾向を示している。内部摩擦角 ϕ' は図-3.4.6, 3.4.7より、相対密度 $D_r = 60\%$ の場合は推定値と実験結果は類似した傾向がみられる。しかし、相対密度 $D_r = 90\%$ になると傾向は類似しているが、推定値は実験結果に対し約7°小さく、今後の検討課題として残されている。

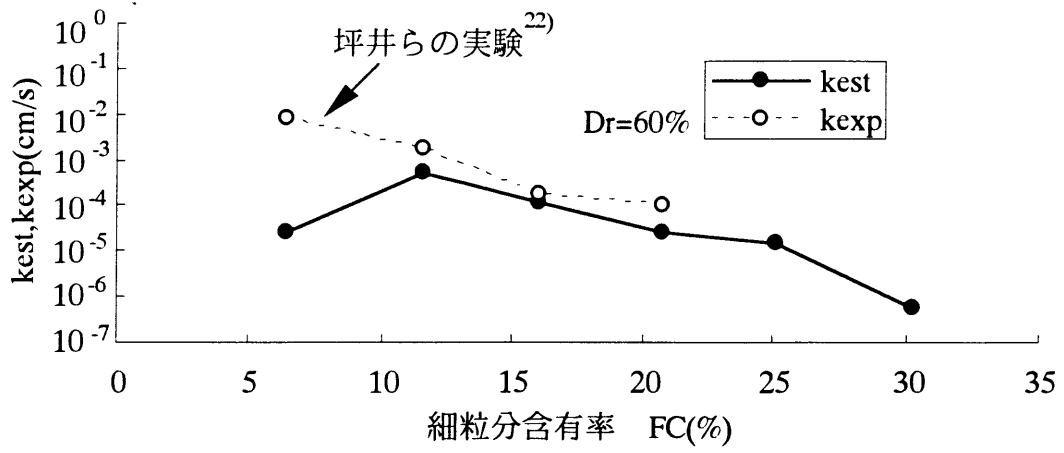


図-3.4.4 細粒分含有率と透水係数($D_r=60\%$)

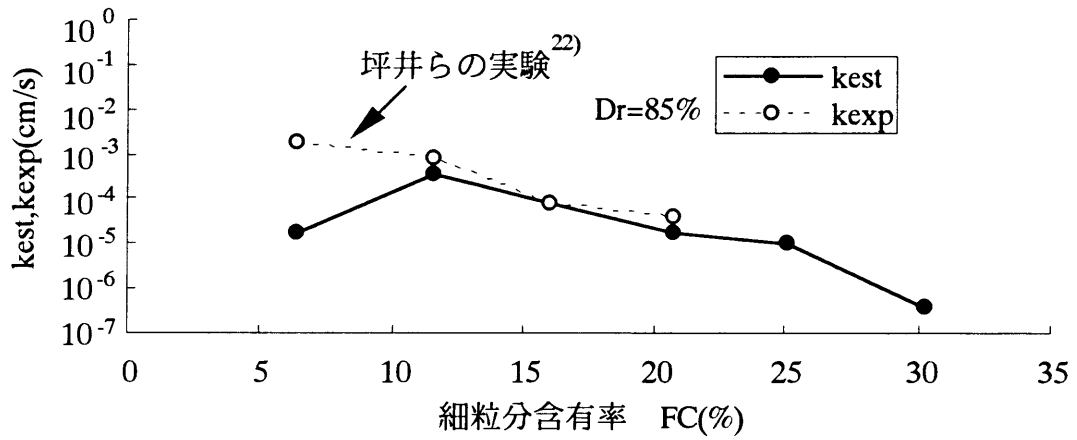


図-3.4.5 細粒分含有率と透水係数($D_r=85\%$)

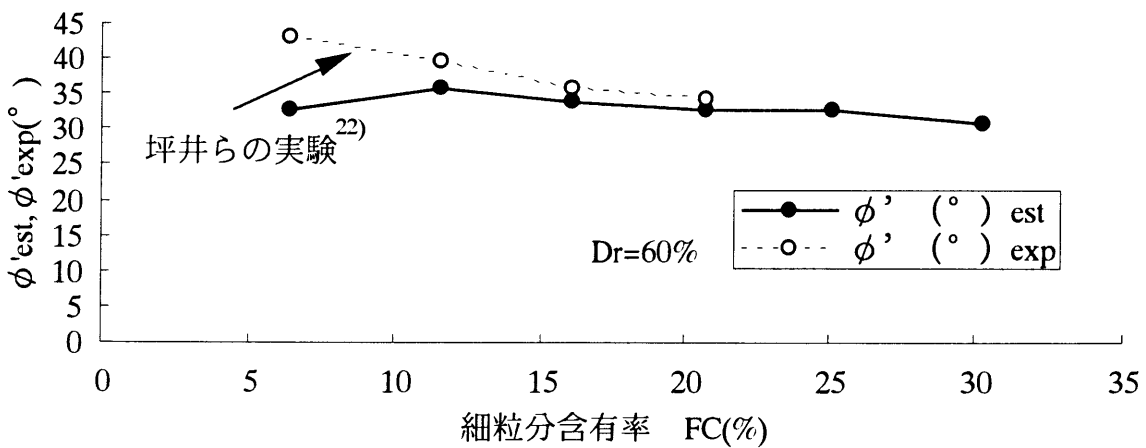


図-3.4.6 細粒分含有率と内部摩擦角($D_r=60\%$)

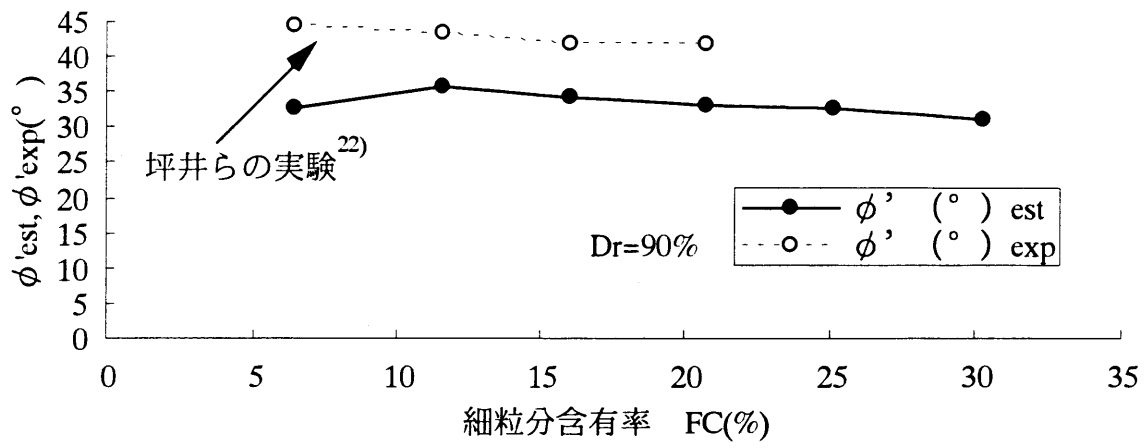


図-3.4.7 細粒分含有率と内部摩擦角($D_r=90\%$)

3.5 施工法選定と粒度評価径

粒度評価径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さや、粒度範囲から一部はみでた場合の評価の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、迅速な判断が可能になり、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-3.5.1は各種文献^{22) ~ 28)}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 d_c の深度方向分布により不均一性を示すことが可能で、しかもその力学的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 $d_c=10^{-2} \sim 10^{-1}(\text{mm})$ 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 $d_c=10^{-3} \sim 10^{-2}(\text{mm})$ 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、電気浸透工法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。このように粒度評価径 $d_c=10^{-3} \sim 10^{-2}(\text{mm})$ 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。

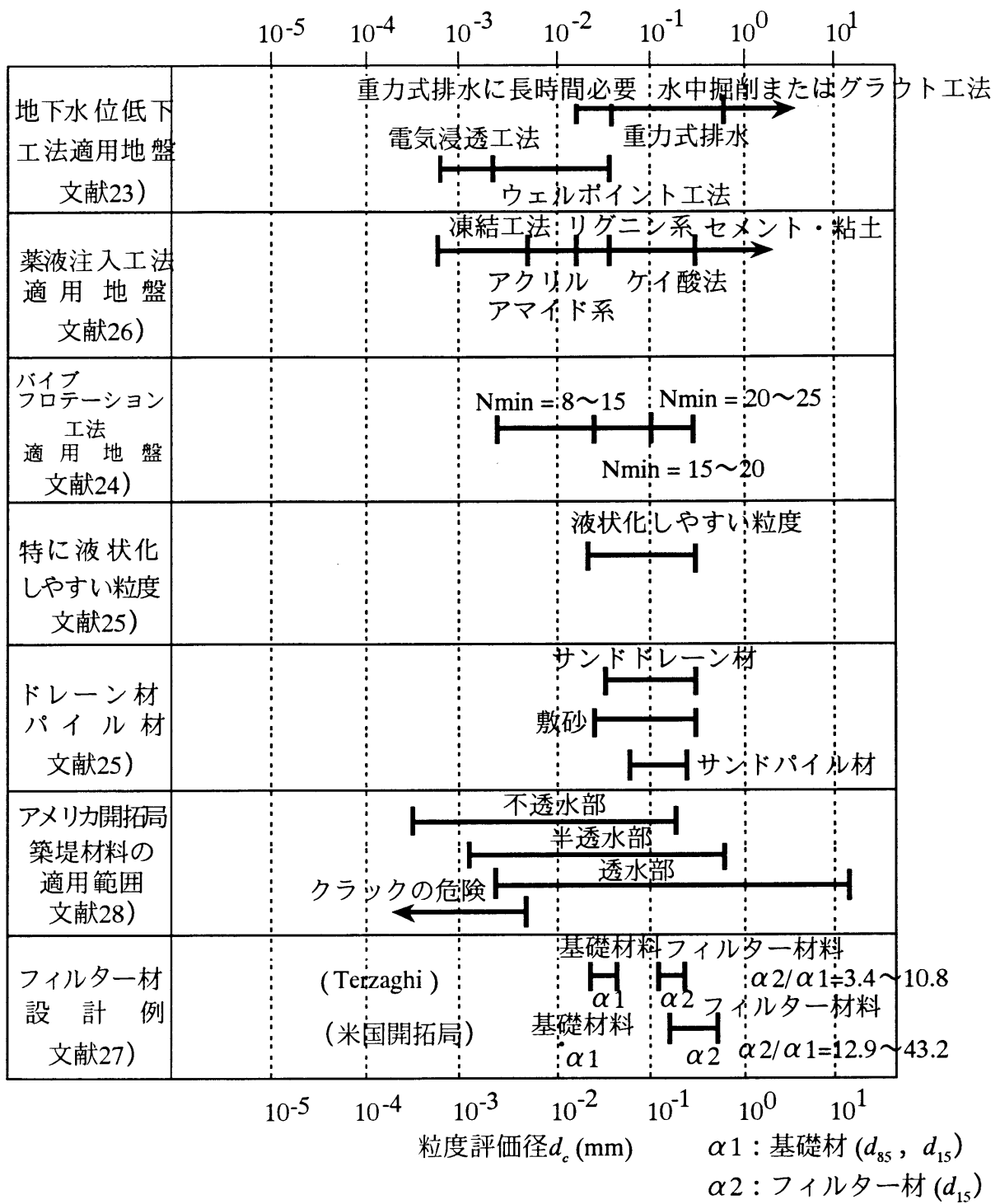


図-3.5.1 粒度評価径法による地盤条件・材料条件の区分

3.6 むすび

本章では土質分類法としての粒度評価径法を提案し、日本統一土質分類法の分類基準になっている土質特性を包含していることを示した。さらに、粒度評価径法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、粒度調整法における粒度評価径法の効果と、粒度評価径 d_e は施工法選定における横断的な統一した土質特性のイメージを与えることを明らかにした。

これらの研究結果は以下のように整理される。

- (1) 個数基準粒度との対応を考慮した質量基準粒度から誘導される粒度評価径 d_e は連続した数値として、土質分類に有効であり、また内部摩擦角 ϕ' や透水係数 k 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 U_e 、曲率係数 U_e' 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 $d_e=10^{-2}$ 、 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 d_e の範囲を求めた。そしてこの関連性の精度を確認するため日本統一土質分類法に対応させて示されている内部摩擦角 ϕ' 、飽和透水係数 k の分布範囲と比較した。この結果、これらの集大成された関係に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) 大礫を含んだ材料の力学試験でよく採用される尖頭粒度や相似粒度等の粒度調整された試料の試験結果から、原粒度の力学特性を外捜する方法を示した。また日本統一土質分類法では、これらの推定は困難であることを明かにした。
- (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。

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第III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，土質工学会第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：熱田砂層の工学的特性，土質工学会第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: 大阪湾岸埋立柱材の密度変化と粒度, 土質工学会第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: 大阪湾岸埋立柱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第III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, 名古屋大学博士学位申請論文, 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, 京都大学博士学位申請論文, pp.303-330, 1957.
 - 9) 福本武明: 粒子破碎機構に関する考察, 土質工学会第24回土質工学研究発表会講演概要集, pp.259-260, 1989.
 - 10) 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, 土質工学会第25回土質工学研究発表会講演概要集, pp.287-288, 1990.
 - 11) ASTM:D3282-83, pp.532-539, 1983.
 - 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, 土質工学会「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, 土質工学会第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) 森満雄, 阿部道雄: レキ混じり土の締固め密度に関する基礎的検討, 土質工学会第23回土質工学研究発表会講演概要集, pp.1997-1998, 1987.
 - 19) 末岡徹, 後藤聡, 茗ヶ原義彦, 小川輝繁: 粗粒材-細粒材の混合割合が締固め特性に与える影響について, 土質工学会「粗粒材の現場締固めの評価に関するシンポジウム」, pp.33-36, 1990.
 - 20) 福本武明: まさ土の粒径分布に関する一考察, 土質工学会第22回土質工学研究発表会講演概要集, pp.165-166, 1990.
 - 21) 宇梶文雄: フィルダム技術ノート, 材料の基本と実際一, 日刊工業新聞社, p.51, 1980.
 - 22) 坪井秀夫, 神田善夫, 奥田真也, 松本淳之介, 中角功, 本郷隆夫: 地盤改良使用砂の細粒分含有率の影響に関する試験結果, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集, 第IV集, pp.572-573, 1994.

- 23) 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.
- 24) 渡辺隆：新潟地震におけるバイプロフローテーションの効果，土質工学会「土と基礎」Vol.13，No.2，1965.
- 25) 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.
- 26) 土質工学会：地盤改良の調査・設計から施工まで，p.48，1978.
- 27) 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.
- 28) 土質工学会編：土と基礎実用数式・図表の解説，p.381，1977.

第4章 粗粒土分類方法の拡張と中間土分類の研究

4.1 はじめに

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¹⁾であることが多い。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等を用いて日本統一土質分類法に準拠しない定義が行なわれている。しかし、中間土も粘性土や砂と同じ粒度評価径 d_e という座標上の位置的關係で示されるならば、土の力学的特性を統一した場で把握することができる可能性を示唆している。

本研究では特に細粒土と粗粒土の組成区分点と、粘性土の透水係数と粒度分布の關係を中心に研究している。この粒度組成区分点は統一土質分類法の基礎的構成要素であるが、連続する土質特性の中から区分の意義をもつ区分点を抽出しなければならない。このため何を根拠にクラス化するかは大きな課題になっている。こうした粒度組成を根拠とする分類法では粘性土の粒度分布曲線にはあいまいさが含まれていることが多くの研究者に指摘されている。そこで、本章では工学的には粒度の透水係数は粒度分布を一面では反映していることを明らかにし、粒度評価径が粘土・粗粒土の両者にも適用できること、従って全体的な評価指標になることを示す。さらに、粒度分布を連続的指標で示す群指数と対比して、粒度評価径が粘土も含めて有効な指標になることを確認した後で、群指数との關係を調べる。図-4.1.1に本章の構式を示す。

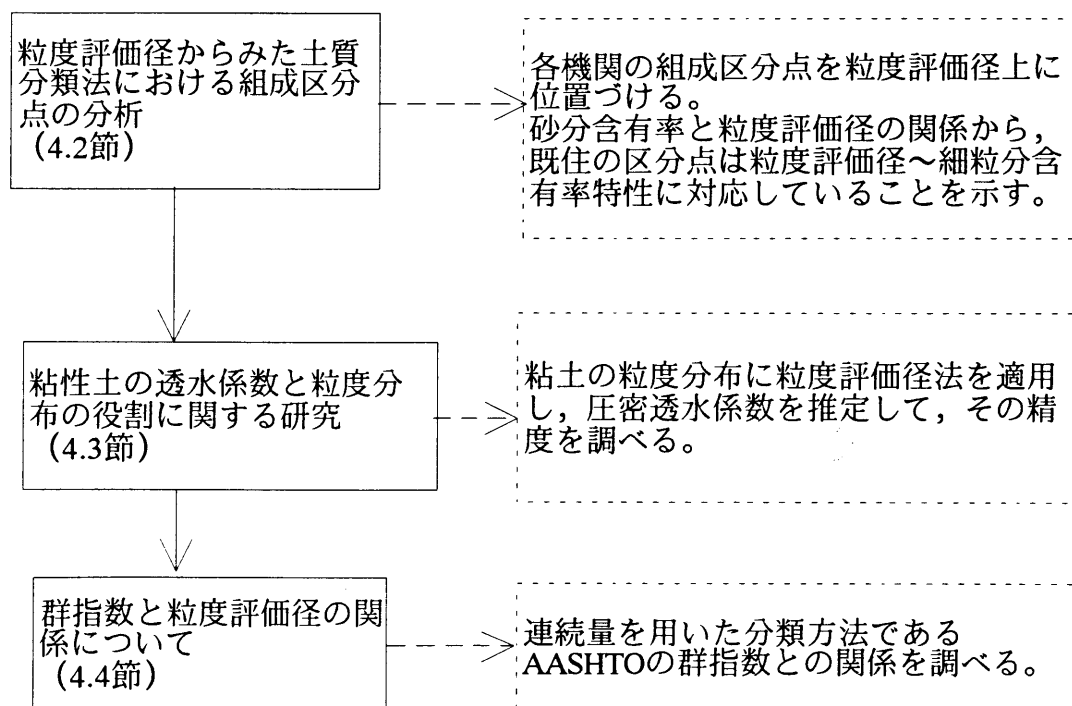


図-4.1.1 本章の構成

4.2 組成区分点と粒度評価径

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に用いられている。しかし、もっと一般的に考えると中間土とは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²⁾されているが、ひとたび区分がなされると分類名間には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 d_e 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-4.2.1³⁾である。表-4.2.1によると粗粒土の細粒分含有率は各国によって類似点と、相異点がある。

表-4.2.1 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	—

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、微妙に異なるが近似した区分法が存在していることは恣意的な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-4.2.1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%付近にまとまっており、土の分類からみた力学的特性の区分点の類似性が期待される。

図-4.2.1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 d_e は大きくなる傾向が見られ、細粒分含有率と粒度評価径 d_e は対応している。従って粒度評価径 d_e は細粒分特性を含有していると考えられる。細粒分含有率と粒度評価径 d_e の関係及びばらつき傾向から領域にわけて分類すると、以下の特徴が指摘できる。

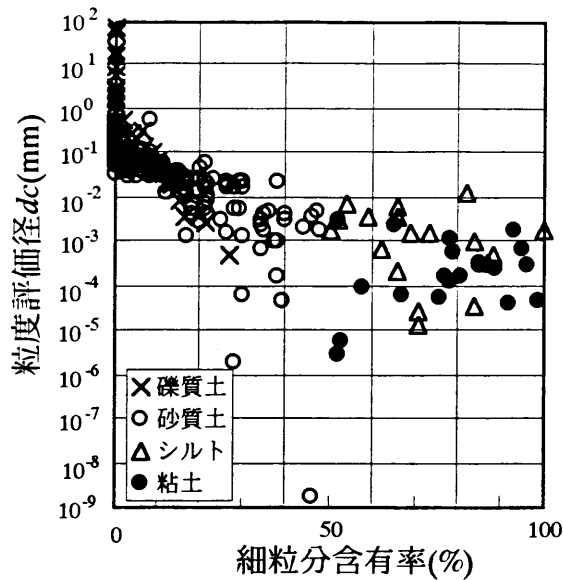


図-4.2.1 細粒分含有率と粒度評価径

- (1) 細粒分含有率が10%以下ではほとんど $d_c > 1 \times 10^{-2}$ (mm)であり、細粒分含有率が0に近づくとつれて粒度評価径 d_c は急激に大きくなる。
- (2) 細粒分含有率が10~20%では大部分が $10^{-3} < d_c < 1 \times 10^{-1}$ (mm)で、細粒分含有率が増大するに従って小さくなる。
- (3) 細粒分含有率が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) 細粒分含有率が30~60%では、 $1 \times 10^{-5} < d_c < 1 \times 10^{-2}$ (mm)の範囲にあり細粒分含有率の増大に伴って粒度評価径 d_c は小さくなる傾向がみられる。
- (5) 細粒分含有率が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、細粒分含有率による変化はみられない。
- (6) 細粒分含有率が70~100%では、細粒分含有率によらず $1 \times 10^{-4} < d_c < 1 \times 10^{-3}$ (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 d_c を用いて詳細に考察したのが表-4.2.2である。表-4.2.2を基にして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とを示している。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。また連続する土質特性から差異性を求める区分点を抽出することは困難であることを示している。しかし、ここで図-4.2.1および表-4.2.2を参考にして、分類基準を提案すると表-4.2.3のように整理される。表-4.2.3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。

表-4.2.2 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 (%)	粒度評価径 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%に近づくとつれ上限値は急激に大となる。
10	90	全体として $d_c = 3 \times 10^{-2}$ が基準。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 $d_c = 2 \times 10^{-2}$ が基準で、細粒含有率が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%以上では、 $d_c > 2 \times 10^{-2}$ となる割合は少ない。
15	85	$d_c = 1 \times 10^{-2}$ に関係しており、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	細粒含有率20%付近では $d_c = 1 \times 10^{-2}$ に分布しているが、傾向的には20%以下では $d_c > 1 \times 10^{-2}$ となる割合が多く、20%以上では $d_c < 1 \times 10^{-2}$ が大部分である。
25	75	細粒含有率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 $d_c < 1 \times 10^{-2}$ 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%の傾向と同様で $1 \times 10^{-3} < d_c < 1 \times 10^{-2}$ にばらついている。
70	30	細粒含有率が70%以上であるならば大部分 $d_c < 1 \times 10^{-3}$ 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。

(d_c : mm)

図-4.2.1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 d_c 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 d_c 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 d_c 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-4.2.3 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 (%)	粒度評価径 d_c の特性 d_c の単位(mm)
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 の上限値は大きくなる。
15	$1 \times 10^{-2} < d_c < 1 \times 10^{-1}$ が大部分である。 d_c は細粒分含有率とほぼ直線的関係にある。
30	$1 \times 10^{-3} < d_c < 4 \times 10^{-2}$ に分布しており、傾向的には細粒分含有率と直線的関係もみられるが、ばらつきが大きい。
70	$1 \times 10^{-3} < d_c < 1 \times 10^{-1}$ に分布しており、細粒分含有率の影響はほとんどみられない。
	$1 \times 10^{-5} < d_c < 1 \times 10^{-3}$ に分布しており、細粒分含有率の影響はみられない。

4.3 粘性土の透水係数と粒度分布

4.3.1 粘性土の粒度分布と透水係数の推定

粘土の粒度試験には多くの未解決の問題が含まれ信頼性が問題になっている。土質試験法では粘土の粒度分布は一般的には比重浮ひようを用いた粒度測定が用いられている。しかし、光透過法や顕微鏡法に比べて細粒部分が多くなる傾向も指摘されている⁴⁾。一方、粘性土の透水係数は一般に圧密試験結果から推定されているが、直接的に透水試験から求める研究もある^{5)・6)}。しかし、これまでの研究成果では圧密試験から求められる透水係数はその整理方法によって異なり、また過圧密領域ではばらつくことが指摘されている。このように粘性土の粒度分布や透水係数は各々信頼性が問題になっている。

本研究では、粘性土の粒度分布と透水係数の関係を検討することによって、両者の信頼性を再評価し、粒度評価径法が形式的には粘性土の力学特性の分類に拡張可能であることを示す。土の粒度分布から飽和透水係数を推定する方法はHazen, Creagerの提案式が一般的に使用されている。Hazenの提案式は2.4章で示したように10%粒径 d_{10} (cm)を用いた式(2.4.3)、Creagerの推定方法は質量基準粒度分布の20%粒径 d_{20} (単位はmm)を用いた式(2.4.4)で示される。Hazen, Creagerの推定式は粒度だけから透水係数を推定するものであるが、粒度評価径法における提案式(2.4.2)あるいは式(3.2.3)は粒度特性と間隙比を含んでいる。しかし、上に示した3式とも d_{10} , d_{20} , d_{50} , d_{60} 等の粒径が必要であるが、粘土の粒度分布から d_{10} , d_{20} を求めることは困難である。そこで本研究を概略的な研究段階として位置づけ、比重浮ひようを用いた粒度分布で比較的信頼できる部分の粒度分布を図-3.3.1に示したように外捜し、 d_{10} あるいは d_{20} を仮定する。比重浮ひようを用いた粒度試験の最小値は一般に0.003mm程度である。本研究では比重浮ひようを用いた粒度試験の信頼性を考慮し、最小値から上の2つの粒径と通過質量百分率を用いた式(4.3.1), (4.3.2)で推定することにした。

$$\ell \log d_{20} = \ell \log d_2 - \frac{P_2 - 20}{P_1 - P_2} \cdot \ell \log \frac{d_1}{d_2} \quad (4.3.1)$$

$$\ell \log d_{10} = \ell \log d_2 - \frac{P_2 - 10}{P_1 - P_2} \cdot \ell \log \frac{d_1}{d_2} \quad (4.3.2)$$

なお、粒度分布に d_{20} , d_{10} が示されていれば、その試験結果を使用することにする。

この粒径を用いて与えられた間隙比に対する透水係数を推定する。粘性土の透水係数は圧密試験結果から圧密係数と体積圧縮指数を介して計算で求められる値を用いた。粘土の圧密試験から求められる透水係数は時間～沈下量曲線から推定した圧密係数 c_v と圧密荷重に対応する体積圧縮係数 m_v を用いて式(4.3.3)で計算される。

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (4.3.3)$$

なお、土質工学会試験法では c_v は一次圧密比 r を用いて、式(4.3.4)で示される c_v' が透水係数を計算する圧密係数として用いられている。

本研究が対象とした透水係数は一次圧密比で補正した値である。

$$c_v' = r \cdot c_v \quad (4.3.4)$$

4.3.2 粘性土の圧密試験結果と粒度から推定した透水係数

表4.3.1, 図-4.3.1は用いた粘土の粒度特性を示している。

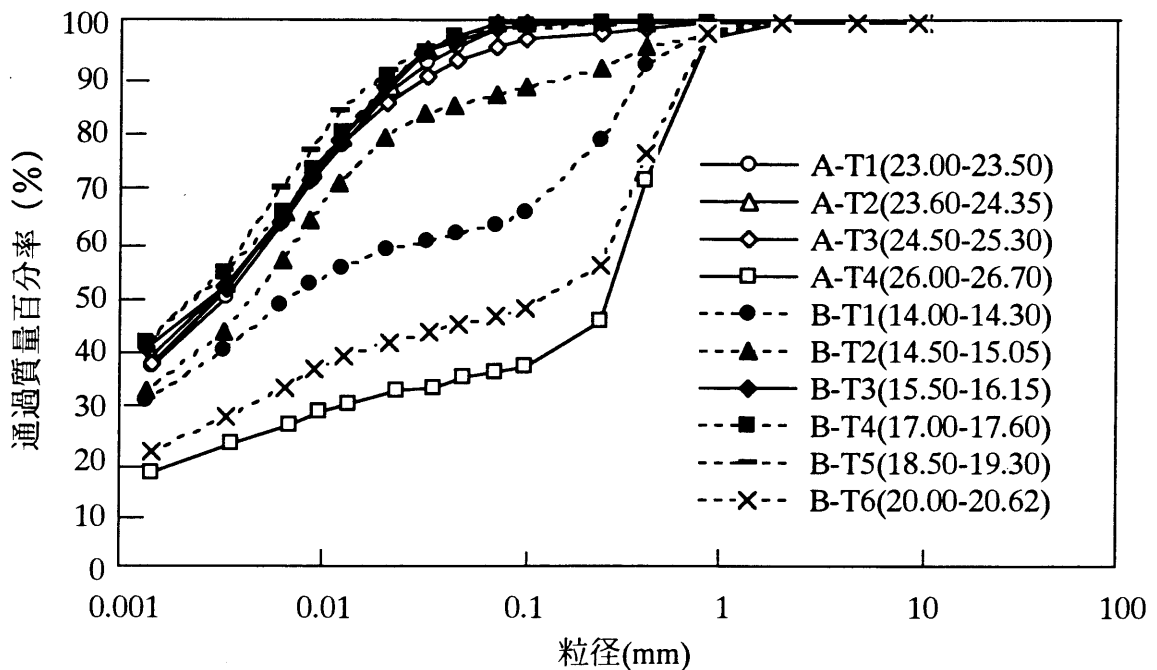


図-4.3.1 粘土の粒度分布

図-4.3.2～4.3.3は圧密試験の結果から求められた圧密荷重段階毎の透水係数と間隙比の関係を示したものである。HazenやCreagerの推定式は間隙比が含まれていないので、間隙比に対して変化しない一定値になる。

表-4.3.1 粘性土の物理特性と粒度評価径

試料名	w1 (%)	wp (%)	pl (%)	0.002 μ m 以下 (%)	d ₁₀ (mm)	d ₂₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₆₀ (mm)	ρ_s (gr/cm ³)	U_c	d_c (mm)
A (23.00 -23.50)	102	36.4	65.5	41.5	0.00049	0.000789	0.0034	0.0055	2.678	11.307	3.30E-04
A (23.60 -24.35)	114	40.3	73.7	43.5	0.00039	0.000647	0.003	0.005	2.651	12.811	2.69E-04
A (24.50 -25.30)	115	33.9	81.4	43	0.00044	0.000719	0.0031	0.0051	2.662	11.551	2.67E-04
A (26.00 -26.70)	50.8	20.8	30	19.5	0.00032	0.002104	0.29	0.34	2.642	1065	2.58E-04
B (14.00 -14.30)	61.9	21.9	40	35	0.00032	0.000693	0.007	0.034	2.644	105.92	1.06E-04
B (14.50 -15.05)	79.3	30.3	49	37	0.00056	0.000944	0.0046	0.0073	2.659	12.964	4.09E-04
B (15.50 -16.15)	81.4	30.5	50.9	45	0.00031	0.000547	0.0029	0.0052	2.67	16.637	2.18E-04
B (17.00 -17.60)	117	36.4	80.6	47	0.00023	0.000417	0.0025	0.0047	2.666	20.534	1.61E-04
B (18.50 -19.30)	106	35.2	70.7	47	0.00046	0.000706	0.0025	0.0042	2.672	9.2174	2.75E-04
B (20.00 -20.62)	65	20.6	44.4	24	0.00039	0.001299	0.15	0.29	2.641	748.85	2.19E-04

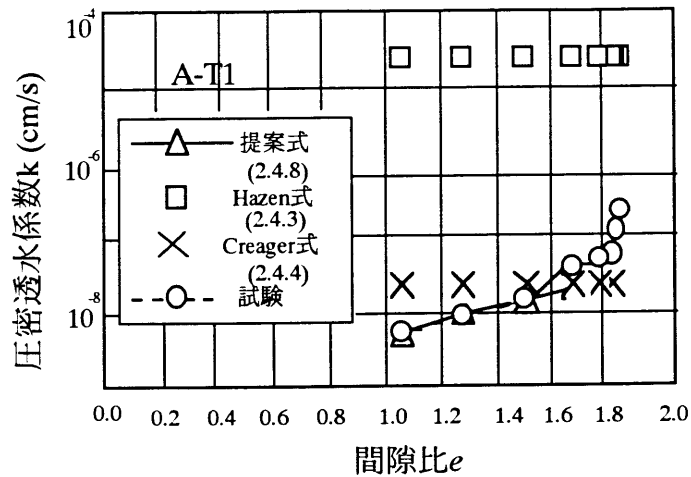


図-4.3.2 粘土の圧密透水係数 (1)

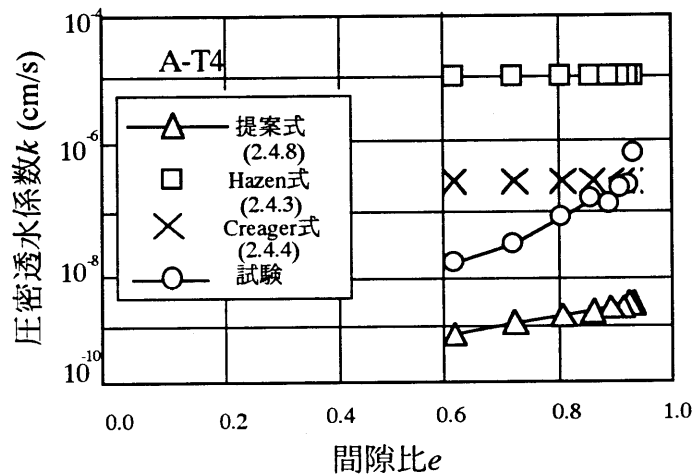


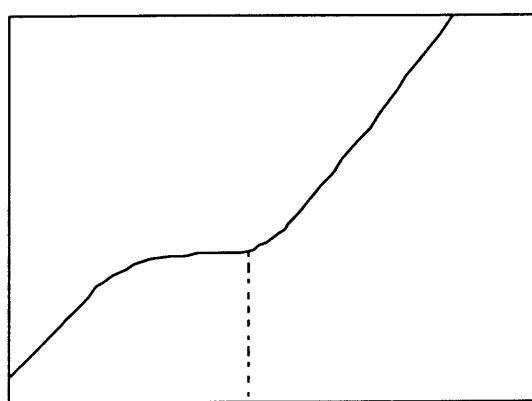
図-4.3.3 粘土の圧密透水係数 (2)

これに対し、提案式 (2.4.2) には間隙比が含まれている。一般に圧密試験結果はある荷重段階と次の荷重段階の圧密沈下量に対して計算される。このため間隙比は変化するが、ここでは両段階の平均間隙比に対してプロットしている。適用した10試料での圧密試験結果の透水係数と粒度や間隙比から求められた透水係数の比較ではいくつかの特徴がみられる。推定値と圧密試験結果の乖離状態を評価したのが表-4.3.2である。表からHazenの式による推定値は圧密試験で得られた透水係数より2オーダー大きいところから過圧密領域の圧密荷重第1段階の透水係数の範囲にあることを示している。上記の3方法の推定式では大きな透水係数を与える。Creagerの式は全体に圧密降伏応力付近の透水係数を与える傾向を示している。3つの推定式の中では中間の値を与える。これに対し、式 (2.4.2) から推定した透水係数は正規圧密領域では間隙比と透水係数の対数の傾向は類似しており、近似度も高いケースが見られる。類似している試験結果は10試料中5試料である。また、推定式の精度を考えて1

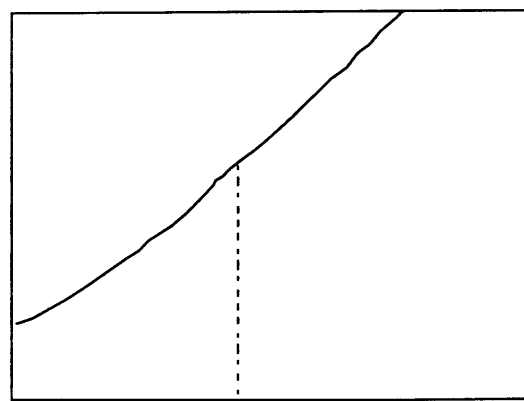
オーダー程度のギャップを認めるならば10試料中8試料は近似度が高い。

表-4.3.2 推定値の評価

	評価		
	式 (3.2.3)	Hanzen式 (2.5.3)	Creager式 (2.5.4)
A(23.00~23.50)	正規圧密領域で類似	圧密降伏応力付近の値に類似	2 オーダー大
A(23.60~24.35)	正規圧密領域で類似	圧密降伏応力付近の値に類似	約 2 オーダー大
A(24.50~25.30)	正規圧密領域で類似	圧密降伏応力付近の値に類似	約 2 オーダー大
A(26.00~26.70)	約 2 オーダー小さい	過圧密領域の値に対応	過圧密領域の値に対応
B(14.00~14.30)	約 2 オーダー小さい	圧密降伏応力付近の値に対応	過圧密領域の値に対応
B(14.00~15.05)	正規圧密領域で類似	圧密降伏応力付近の値に対応	約 1 オーダー大きい
B(15.50~16.15)	約 1 オーダー小さい	最大圧密荷重付近の値に対応	過圧密領域の値に対応
B(17.00~17.60)	約 1 オーダー小さい	最大圧密荷重付近の値に対応	圧密降伏応力付近の値に対応
B(18.50~19.30)	正規圧密領域で類似	圧密降伏応力付近の値に対応	過圧密領域の値に対応
B(20.00~20.62)	約 1 オーダー小さい	圧密降伏応力付近の値に対応	過圧密領域の値に対応



74 μm
(a)



74 μm
(b)

図-4.3.4 粒度曲線の形状

このギャップが大きい粒度曲線は図-4.3.4の (a) に示すように75 μ m粒径付近にみられる曲線が段階状の時生じている。図-4.3.4 (b) のような滑らかな粒度曲線であれば近似度は高い。

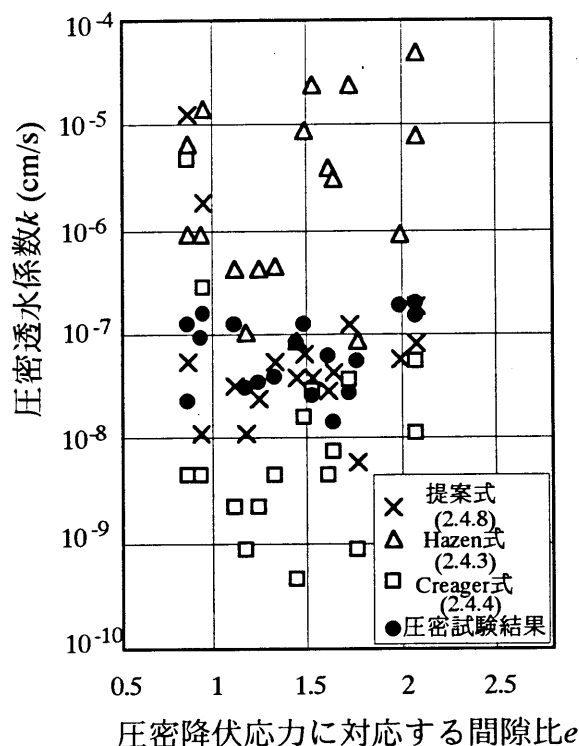


図-4.3.5 間隙比と圧密透水係数

図-4.3.5は洪積粘土を含む粘土の圧密試験結果の透水係数と粒度から推定した結果を示している。なお、式 (2.4.2) に必要な間隙比は圧密降伏応力に対応する間隙比を用いて計算したものである。●印は実験結果で、間隙比が1.5以上になれば圧密透水係数は大きくなり、また間隙比が1付近より小さくなれば同様に圧密透水係数は増加する傾向を示している。提案式もこのような傾向を示している。また結果ではCreagerの推定式は提案式 (2.4.2) の推定式に比べ小さい傾向を示している。

式 (2.4.2) 及びHazen, Creagerの式は10%粒径, 20%粒径 d_{10} , d_{20} 等が求められる砂の透水係数に対して適用されてきた。透水係数 k のオーダーは $10^4 \sim 10^0$ (cm/s)である。この範囲ではこれらの式の推定度は2オーダーの範囲にはいれば良好である。一方、本研究で対象とした粘土の透水係数は $10^5 \sim 10^3$ (cm/s)のオーダーにあり砂の透水係数に比べかなり小さい。図-4.3.6は巾広い透水係数の範囲にわたって比較したものである。

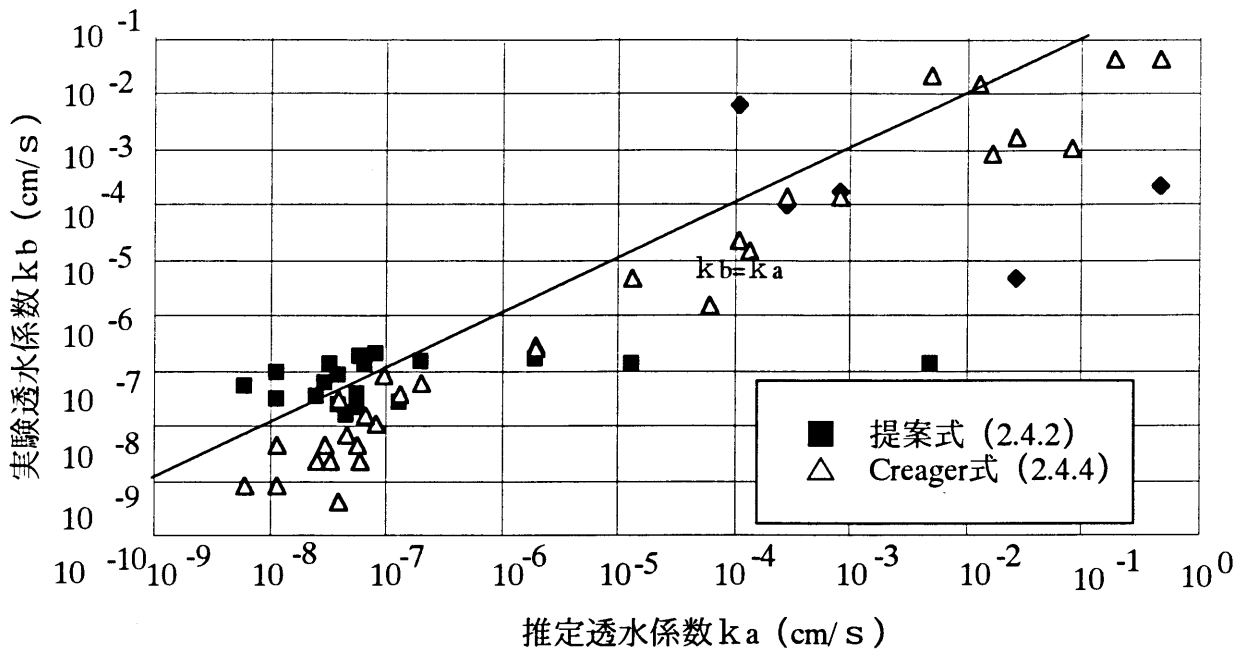


図-4.3.6 透水係数における推定精度

本研究では d_{10} 、 d_{20} の粒径が求められない粘土の粒度試験曲線を単純に外捜して d_{10} 、 d_{20} を求め透水係数を推定した。従って、これらの推定結果は試験結果に対して大きくばらついても奇異とは思われないが、予想に反しばらつきのかなり小さい結果が得られた。特に式(2.4.2)で求めた推定結果は間隙比の変化に対する透水係数の変化にも対応している。このことは比重浮ひよによる粒度分布は必ずしもほうむりさらされるような条件にないことを示している。もっと積極的に利用できる可能性を示している。これらの結果から比重浮ひようを用いた粘土の粒度試験結果は必ずしも信頼性がないものとして捨てることはできない意義をもっていると考えられる。図-4.3.6では式(2.4.2)もCreager式も広範囲な粒度にわたって適用できることを示している。

4.3.3 Taylorの式と提案式の比較

圧密係数を変数とする粘土の圧密解析では透水係数と間隙比の関係が必要であるが、この場合、透水係数の対数と間隙比の線形性を仮定したり、Taylorの式⁷⁾が用いられたりする。本節では、Taylorの式をとりあげて提案式と比較する。Taylorの式は、式(4.3.5)で示される。

$$k = D_s^2 \frac{\gamma_w}{\eta_w} \frac{e^3}{1+e} c \quad (4.3.5)$$

ここに D_s :10%粒径,あるいは粒度分布より $1/D_w = \sum (P_i/D_i)$ によって求められる粒径(cm)である。 P_i はある粒径範囲を代表する平均粒径 D_i の試料が全試料に対して占める含有率である。 γ_w :水の単位体積質量(gf/cm^3), η_w :水の粘性係数($\text{g/(cm}\cdot\text{s)}$), c :形状係数, k :透水係数(cm/s), e :間隙比である。

式(4.3.5)の両辺を対数表示すると式(4.3.6)になる。

$$\ell \log k = 2\ell \log D_s + \ell \log \left(\frac{e^3}{1+e} \right) + \ell \log \left(c \frac{\gamma_w}{\eta_w} \right) \quad (4.3.6)$$

一方提案式は,式(3.2.3),式(3.2.6)より式(4.3.7)が得られる。

$$\ell \log k = 2.87\ell \log d_c + \ell \log e^{2.87} + \ell \log \left(\frac{10}{G_s} \right)^{2.87} \quad (4.3.7)$$

両式の右辺第1項はいずれも粒径に関する項で式の上では右辺第1項は類似している。Taylor式の D_s は10%粒径あるいは粒度分布から計算によって求められる。これに対し提案式の粒度評価径 d_c は粒度分布の代表値から容易に計算され,間隙モデルとしての物理性も確認されている。右辺第2項は間隙比に関する項で,形はやや異なっているが,間隙比0.4から3.0の範囲では図-4.3.7に示すようになり,式(4.3.8)の範囲にある。

$$\frac{e^{2.87}}{\frac{e^3}{1+e}} = 1 \sim 4 \quad (4.3.8)$$

従って右辺第2項も一般的な土質状態では同一レベルの値になることを示している。右辺第3項は定数項である。以上の比較結果では, Taylorの式と,提案式は類似したレベルの透水係数と,粒径や間隙比に対する変化特性を与えることが予想できる。具体的な適用研究として後章(5章,5.5.2)で大阪と釜山の粘性土を対象にした比較研究で示すが,実用的な点ではTaylorの式の D_s は物理的意味があいまいであるのに対し,提案式 d_c は物理性が比較的明らかであり粒度分布から容易に計算できるという意味では提案式が実用的といえる。

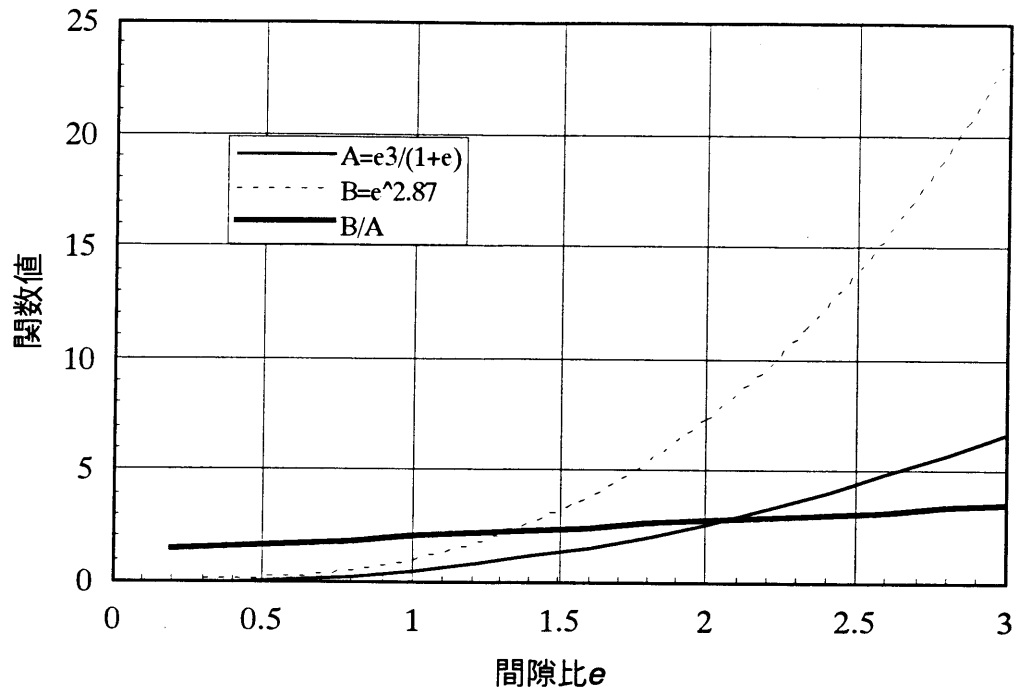


図-4.3.7 Taylorの式と提案式の関係

4.4 群指数の役割と粒度評価径

4.4.1 群指数の定義

質量表示の粒度分布から、個数表示の粒度分布の代表値を求め、後者の概念を利用して透水係数 k や内部摩擦角 ϕ' に対する経験式を誘導した。そして、この中で粒度分布の代表値として粒度評価径 d_c を定義し、この値によって日本統一土質分類法の構造的特性を明らかにすることができた。この粒度評価径 d_c は一種の連続量であるため、分類名表示による分類内の土質特性の平板化を克服することができる。分類手法として連続量を対応させる方法を採用しているのはアメリカAASHTOの群指数 GI があり、AASHTO基準NO.M145及びASTM基準D3582-32になっている。本節では同じ連続量を基礎とする分類方法になる群指数 GI と粒度評価径 d_c の関係を示すことによって粒度評価径法の細粒土分類を含めた一般性の意義を明らかにする。群指数 GI は式(4.4.1)により与えられている。

$$GI = (F_1 - 35) [0.2 + 0.005(w_L - 40)] + 0.01 (F_2 - 15) (I_p - 10) \quad (4.4.1)$$

ここに F_1 :75 μ mふるいを通過する質量百分率(%), ただし F_1 の最大値は75%, F_2 の最大値は55%, w_L :液性限界(%), ただし w_L の最大値は60%, I_p :塑性指数(%) ただし I_p の最大値は30%である。各分類群指数の関係は表-4.4.1のように示されている。

表-4.4.1 AASHTOの分類指数⁸⁾

大分類	粗粒土(No.200ふるい通過量35%以下)							シルト, 粘土質土(No.200ふるい通過量35%以上)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
群分類	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
ふるい分析(通過量%)	50以下	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
No.10(2.00mm)	30以下	50以下	51以下	—	—	—	—	—	—	—	—
No.40(425 μ m)	15以下	25以下	10以下	35以下	35以下	35以下	35以下	36以上	36以上	36以上	36以上
No.200(75 μ m)	No.40(425 μ m)ふるい通過部分の性質										
液性限界	—		—	40以下	41以上	41以上	41以上	40以下	41以上	40以下	41以上
塑性指数	6以下		NP	10以下	10以下	11以上	11以上	10以下	10以下	11以上	11以上
普通の主要構成物	砂礫, 砂		細砂	シルト質または粘土質の砂利と砂				シルト質土		粘土質土	
路床土としての良否	優 ~ 良							可 ~ 不良			
群指数*	0	0	0	0			4以下	8以下	12以下	16以下	20以下

*AASHTO分類法ではこの欄は省く。群指数は分類名の後に()で示すことになっている。

この計算では GI が負の値になると0とし、また、液性限界が求められなかったり、NPの場合は0とすることが決められている。この分類法の利用方法として、土の統一分類法との対比もなされており、また地盤反力係数等道路構造上必要な土質特性が

示されている^{8), 9)}。

4.4.2 群指数と粒度評価径

AASHTOの分類法では、粗粒土と細粒土の区分は細粒分含有率35%を基準にしている。この基準はイギリスの分類法に類似しており、日本統一土質分類法50%規準とやや異った基準になっている。しかし表-4.4.1に示されるように粗粒土については群指数だけでは分類名にいきつくことはできない。それはA-1, 3, 2の場合群指数は $GI=0$ であって、区別することはできないからである。道路構造材料としての適否で考えると、この方法でいいのかもしれないが、もしこのような群指数 GI を幅広く土質分類に使用することを考えると大きな制約条件になる。また群指数 GI の計算では $75\mu\text{m}$ フルイ通過率の最大値を75, 55%, 液性限界の最大値を60%, 塑性指数の最大値を30%に限定しているため群指数 GI の範囲は0~20になる。本研究では群指数 GI の粗粒土と細粒土の両者に対する幅広い適用条件を考察することが目的であるため、群指数 GI の計算上の制約条件を外した場合も検討した。そして正規の方法で計算した群指数を正規群指数 GI (正規) とし、制約を無視して計算した場合の群指数を一般化群指数 GI (参考) と命名した。図-4.4.1は両者の計算方法で得られた群指数をプロットしている。

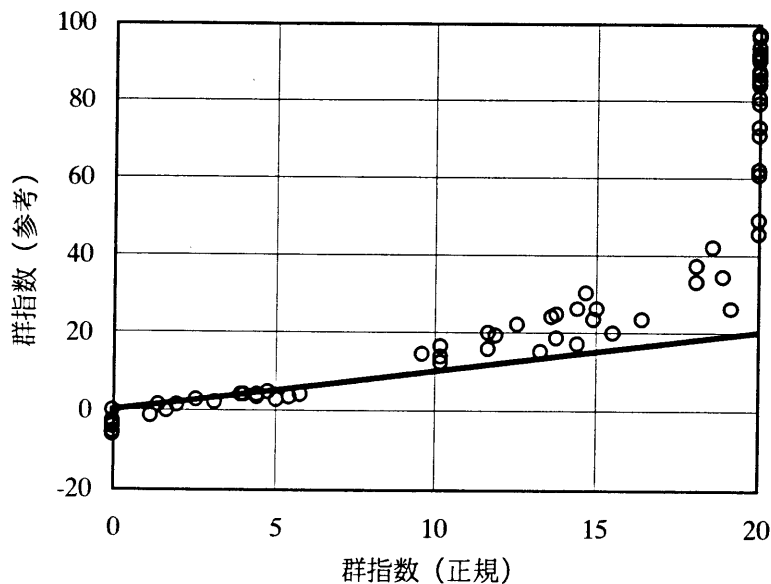


図-4.4.1 群指数の計算方法の比較

正規の条件下で計算した群指数 GI (正規) を基準にすれば $0 < GI \leq 20$ の範囲では、制約をはずして計算された一般化群指数 GI (参考) とは強い相関がみられるが、群

指数 GI （正規） >10 付近から後者の値がやや大きくなって来る。つまり、正規群指数 GI （正規）の計算における制約条件によって制約外の土質特性を閉じ込める役割を果たしていることがわかる。また正規群指数 GI （正規）が0の場合でも、一般化群指数 GI （参考）は値があり、正規群指数の両端部に属する土の特性に対応する可能性がある。

図-4.4.2は群指数 GI と粒度評価径 d_c の関係を示している。

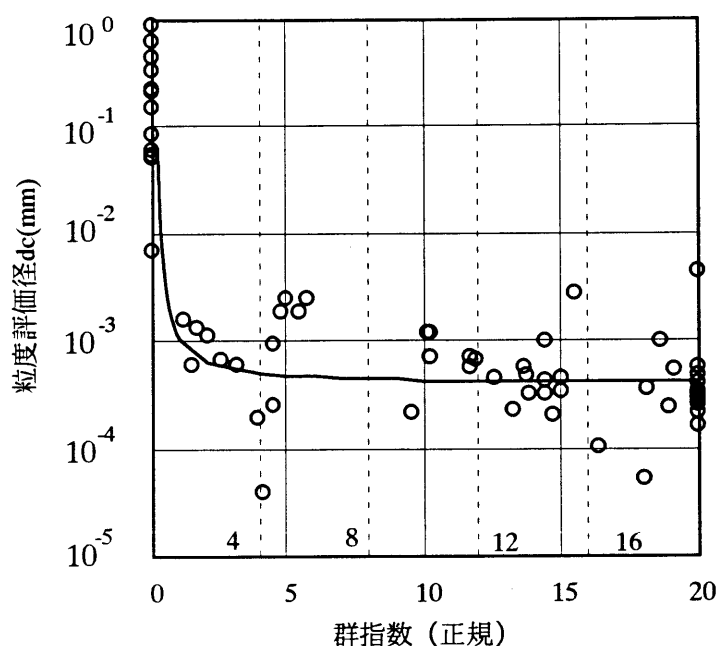
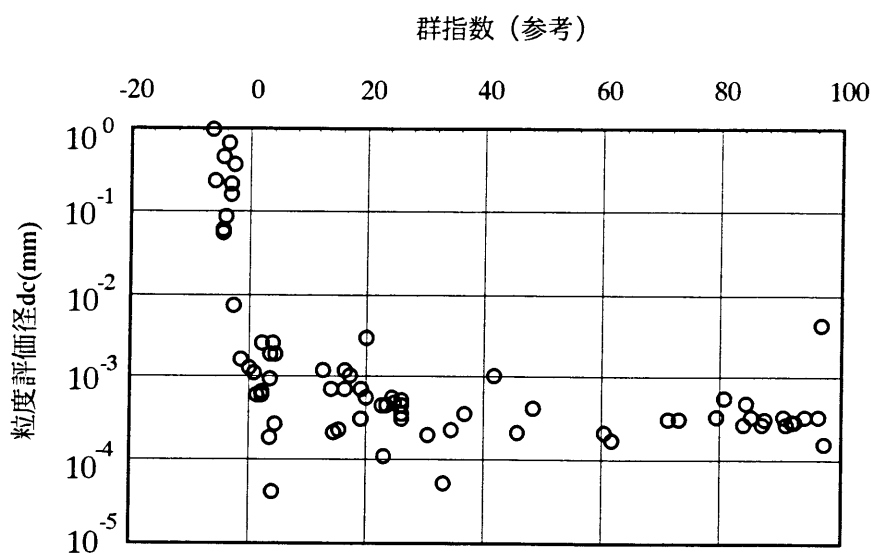


図-4.4.2 粒度評価径と群指数

群指数 $0 < GI \leq 20$ のゾーンにおいては粒度評価径 d_c と群指数 GI の関係はばらつきはあるが近似的に式（4.4.2）で近似化される関係にある。

$$d_c = 0.0004 \cdot \exp\left(\frac{1}{GI}\right) \quad (4.4.2)$$

これに対し図-4.4.3に示すように一般化群指数 GI （参考）も粒度評価径 d_c と双曲線関数的な関係を示しているが、正規群指数 GI （正規）が20以上になれば、粒度評価径 d_c はほとんど変わらず類似した値になる。また正規群指数 GI （正規）の場合は $GI < 0$ になることはないが、制約をはずした一般化群指数 GI （参考）と粒度評価径 d_c の関係は、群指数がマイナスの時0.001以上の粒度評価径 d_c が対応し、群指数 GI （参考）がマイナスになれば、粒度評価径 d_c は増大する傾向が示されている。



従って粒度評価径 d_c は細粒土で群指数 GI と対応関係があり、かつ群指数 $GI=0$ として同一グループに扱われていた粗粒側でも連続した値になり分類が可能となる。この意味では粒度評価径 d_c が群指数に比べて適用範囲があり、また、細粒土側では群指数の特性と類似した関係を与え、整合的である。図より群指数 GI と粒度評価径 d_c の関係は表-4.4.2のように示される。

表-4.4.2 粒度評価系とAASHTO分類の群指数

	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-2-5 A-2-6
群指数	0	0	0	0	4以下			8以下	12以下	16以下	20以下
粒度評価径	約 2×10^{-3} 以上				約 2×10^{-3} ~ 1×10^{-3}			約 1×10^{-3} ~ 9×10^{-4}	約 9×10^{-4} ~ 8×10^{-4}	約 8×10^{-4} ~ 5×10^{-4}	約 5×10^{-4} ~ 3×10^{-4}

粒度評価径 d_c を使用すればA-1,2,3のゾーンをさらに詳細に分類できることを示している。表-4.4.3はAASHTOの分類とCasagrandeの関係を示してあり、片平の「道路工学」⁹⁾から引用した。さらにCasagrandeの分類に対応すると考えられる日本統一土質分類法と粒度評価径 d_c の関係は既に研究されているので、最下段には日本統一土質分類法に対応する粒度評価径 d_c を示した。

表-4.4.3 AASHTO分類の群指数と統一分類法

	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-2-5 A-2-6
Casagrande の分類	GC,SC		GW GP	GF,S				ML,CL,OL,	MH	CL,CH	CL,OL,CH,OH
粒度評価径	1×10^{-2} $\sim 1 \times 10^{-1}$		1×10^{-1} $\sim 1 \times 10^1$	$1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-2}$				1×10^{-5} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-6} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-6} $\sim 1 \times 10^{-3}$	1×10^{-6} $\sim 1 \times 10^{-5}$

この結果によれば正規群指数と粒度評価径の関係から求めた関係と分類名を根拠に求めた粒度評価径と群指数の関係は類似した結果を得ることができた。従って表-4.4.3より表-4.4.2では群指数GI=0のグループA-1,A-3,A-2もそれぞれグループに分類できることを示している。

4.5 むすび

本章では幅広い粒度分布からなる中間土を対象に粒度評価径法の適用条件として研究した結果を示した。この中では細粒分含有率あるいは砂分含有率で示される含有率区分点を粒度評価径 d_e の座標上で特徴づけることができた。粒度評価径法は粗粒土をモデルとして導入した考えであるが、中間土の分類や粘土の圧密透水係数等と粒度評価径法が密接に関係していることを明かにすることによって、モデル自体の検討の余地が残されているが、粒度評価径法が細粒土の分類にも拡張できることを示した。最後に細粒分含有率やコンシステンシー特性から構成されるAASHTOの群指数 GI と粒度評価径 d_e を比較し、両者に強い相関があることを明かにした。

以上の結果から粒度評価径法は粘土も含めた中間土にも適用できることを示し、粗粒土から細粒土まで統一的に分類できる分類指標として有効であることがわかった。

以下に本章で明かになったことを列記する。

- (1) 細粒分含有率は土を分類する区分点を与える指標となっている。しかし国によって基準が少しずつ異なっているが、粒度評価径法で整理すると、これらの特徴を分類することができることを示した。
- (2) 粒度評価径法に基づいて細粒分含有率で土質を区分するとすれば5, 15, 30, 70%が区分点になることを提案した。
- (3) 粘性土の正規圧密部分の圧密透水係数は粒度分布と強い相関があることを指摘し、粒度評価径法で推定可能であることを示し、粒度分布の形状と推定精度の関係を明かにした。
- (4) 粒度評価径法における透水係数の推定式は粘土の非線形圧密解析上で用いられるTaylorの式と関数構造上類似した特徴を有していることを示した。
- (5) 群指数は粗粒土から細粒土を対象とした分類指数として提案されている。しかし粗粒土では群指数 GI は $GI=0$ になり、広範な特性を持つ土質分類に対応していないことを明かにした。これに対し粒度評価径法は細粒土では群指数と強い相関があり、群指数では $GI=0$ になる粗粒土の分類もできるので、粗粒土と細粒土に適用されることを示した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 土の判別分類基準化委員会：土質分類法ならびに分類結果表示の基準案，土質工学会「土と基礎」，Vol.20，No.5，pp.74，1972.
- 3) 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，pp.93-96，1972.

- 4) 牟田明德，渡辺薫樹：関東ロームと粘土の正しい粒度分布（液中沈降粒度分布測定法の問題点について），第20回コロイド化学討論会講演予稿集，pp.81-82，1967.
- 5) 今井五郎，村本勝己：圧密係数に関する2，3の検討，土質工学会第24回土質工学研究発表会講演概要集，pp.433-436，1989.
- 6) 高根弘志，柏木淳男，有泉浩蔵，山内一秀，早川敦：飽和粘土の透水係数について（その1 圧密実験），土質工学第21回土質工学研究発表会講演概要集，pp.179-181，1986.
- 7) 宇野尚雄，杉井俊夫，神谷浩二：比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察，土木学会論文集，No.469，III-23，pp.25-34，1993.
- 8) 卷上安繭，福本武明，荻野正嗣：道路工学，理工図書，pp.161-163，1988.
- 9) 片平信貴：土木工学監修「道路工学」，技報堂，pp.242-246，1967.

第5章 粒度評価径法の適用性に関する研究

5.1 はじめに

4章までに粒度評価径法による連続的な分類指標を示して、この方法は日本統一土質分類法に蓄積された土質特性を含んでいることを明かにした。また、連続的な分類指数として群指数 GI をとりあげ、正規の方法による群指数 GI とは $0 < GI < 20$ の範囲で相関関係があることを示した。また、制約条件をはずした群指数 GI は $GI < 0$ になると粒度評価径 d_e が急激に大きくなる場所に対応していることを示した。

このように、粒度評価径法は連続的な分類指標で、土質特性の分類に役立つことを示してきた。本章では、この有効性を検証するため、できるだけ広範囲な項目をあげて、粒度評価径法の適用条件を検討する。

図-5.1.1は本章の構式を示す。

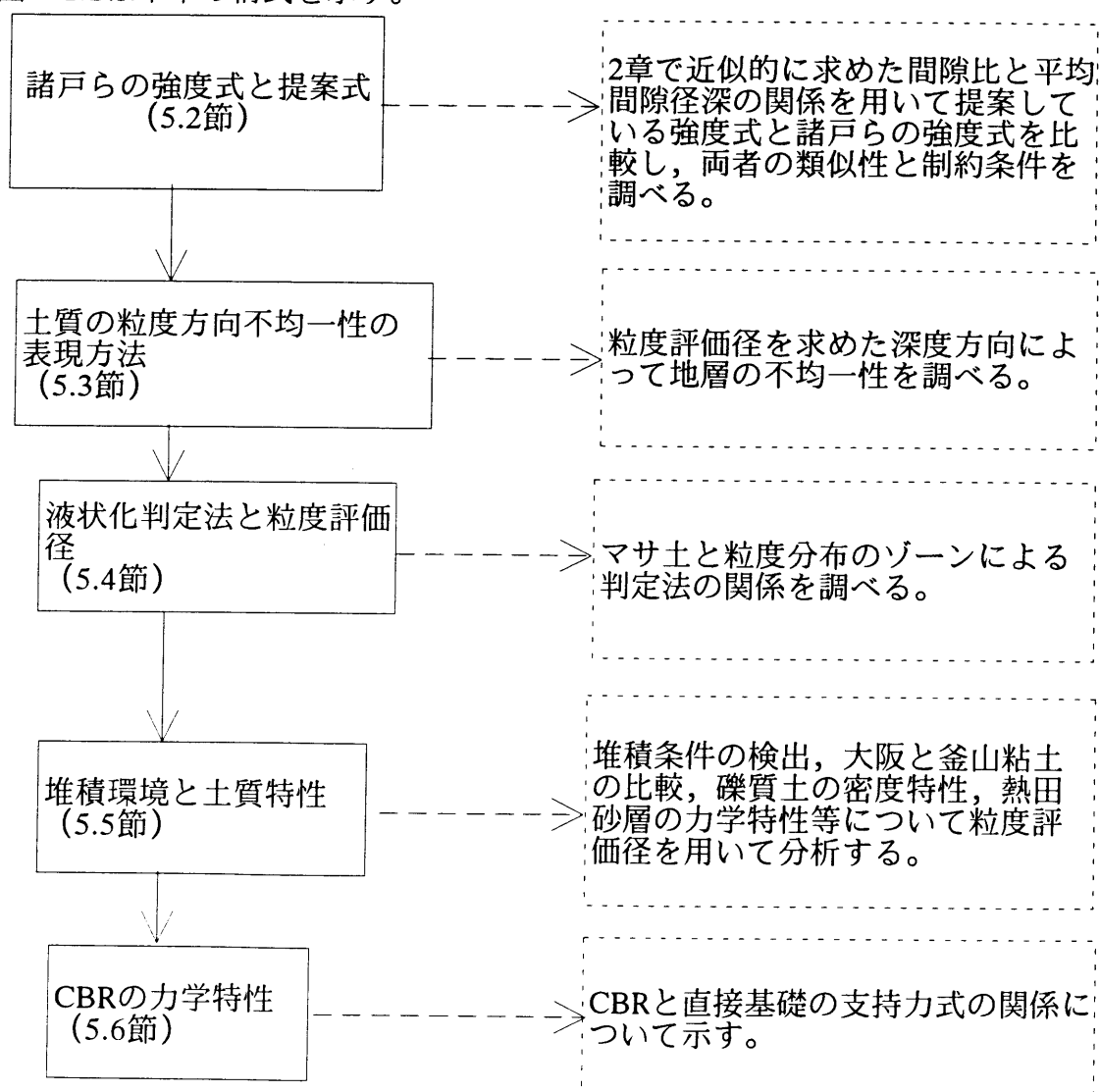


図-5.1.1

5.2 諸戸らの強度推定と粒度評価径法による提案式の比較

5.2.1 諸戸らの強度推定式

これまでの研究で粒度と間隙比を用いて提案式(3.2.4)によって推定した強度は実験値に対し、 $\pm 4^\circ$ の範囲にあることがわかっている^{1), 2)}。しかし、種々の条件に適用してみると粒度評価径法における強度推定式は間隙比の変化に対応した内部摩擦角の変化が実際に比べやや小さいこともわかってきた。一方、諸戸³⁾、下辺・諸戸⁴⁾・⁵⁾は統計理論に依拠して誘導された最上の強度式⁶⁾で示された強度定数 \bar{k} と最小間隙比 e_{min} の関係式を与え、幅広い間隙比に対し適用できることを示している。これらの誘導過程では、最小間隙比 e_{min} は材料特性値という仮定に立脚している。最小間隙比 e_{min} に関しては土質工学会でもシンポジウムが開催され、均等係数 U_e 等との関連⁷⁾が示されているが、充分解明されたとはいえない。

本研究は粒度評価径法による強度提案式を再検討する過程として最小間隙比 e_{min} と粒度や粒径との関係を調べ、この最小間隙比 e_{min} と提案式の強度推定式を用いることによって、諸戸らの $\bar{k} \sim e_{min}$ チャート上の特性関係を分析することを目的とした。最上は統計理論に基づいて強度と間隙比の式(5.2.1)を誘導した⁶⁾。

$$\sin \phi' = \frac{k}{1+e} \quad (5.2.1)$$

ここに k は定数を示す。諸戸はこの関係式を粒状体のエントロピー理論を用いて検討している³⁾。また実験データに基づいて下辺・諸戸⁵⁾は式(5.2.2)、(5.2.3)の関係式を示している。

$$\bar{k} = 0.2660 \cdot e_{min} + 0.314 \quad (5.2.2)$$

$$\bar{k} = 0.260 \cdot e_{min} + (1.114 - 0.544R) \quad (5.2.3)$$

ここに \bar{k} は式(5.2.1)の定数 k の平均値、 e_{min} ：最小間隙比、 R ：Powerのラウンドネス・スケールである⁸⁾。

図-5.2.1は2つの式を図示したものでラウンド・ネスが決まると、粒度配合によって均等係数が大きくなれば左下方にズレていく傾向をあらわしている。従って、この図より \bar{k} は最小間隙比 e_{min} の関数で示され、 \bar{k} が求められると間隙比の変化に対する内部摩擦角 ϕ' は式(5.2.4)によって推定される。

$$\sin \phi' = \frac{\bar{k}}{1+e} \quad (5.2.4)$$

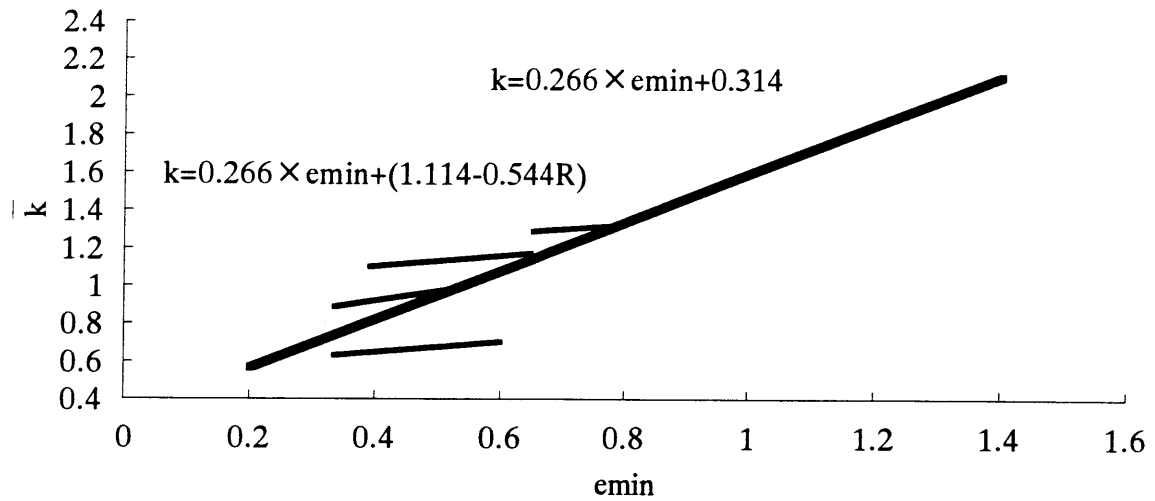


図-5.2.1 諸戸・下辺らの強度推定式における $\bar{k} \sim e_{min}$

つまり式 (5.2.1) の強度定数 \bar{k} は材料によって決まる材料定数である。また、最小間隙比 e_{min} も材料によって異なる材料定数であるから強度定数 \bar{k} は最小間隙比 e_{min} と直接的な関係があるという考えのもとに式 (5.2.2) ~ (5.2.4) が誘導された。諸戸・下辺の研究では式 (5.2.4) で示されるように粒形の影響も考慮にいれているのが特徴である。そして多くのデータは彼らの実験式の有効性を示している。

本研究の課題は粒度評価径法による強度推定式と最小間隙比の2つを組みあわせ、図-5.2.2に示すように $\bar{k} \sim$ 最小間隙比 e_{min} の関係を求めた。前提とした50%粒径 d_{50} から60%粒径 d_{60} 、均等係数 U_c を仮定して、それに対応する最小間隙径深 h_{min} を求める。この h_{min} から間隙比 e_{min} が得られるので提案式により内部摩擦角 ϕ' が推定できる。この結果から \bar{k} が得られる。

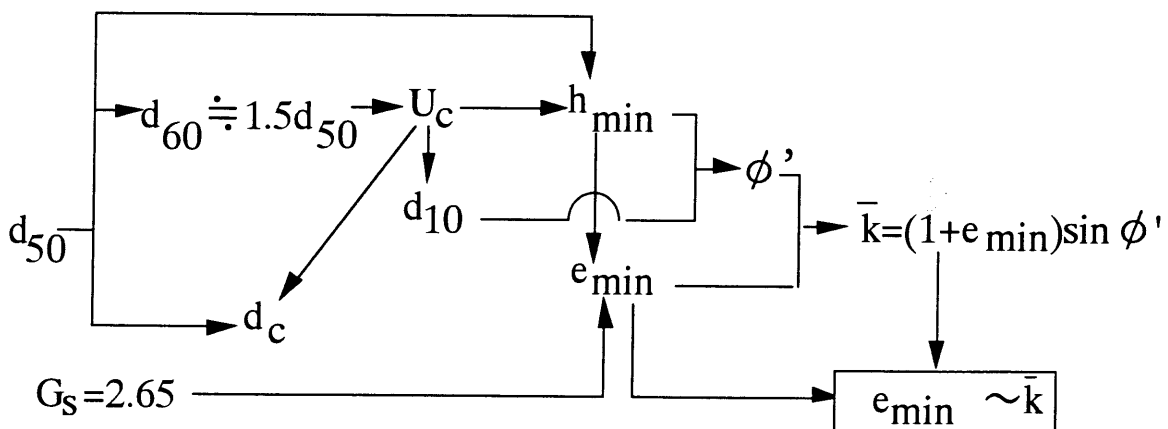


図-5.2.2 粒度評価径法による $e_{min} \sim \bar{k}$ 関係の求め方

5.2.2 強度推定式の比較

図-5.2.2に従って式(3.2.1)と式(3.2.4)を用いて強度定数 \bar{k} を求め、下辺・諸戸らのチャートに重ね書きしたものが図-5.2.3である。

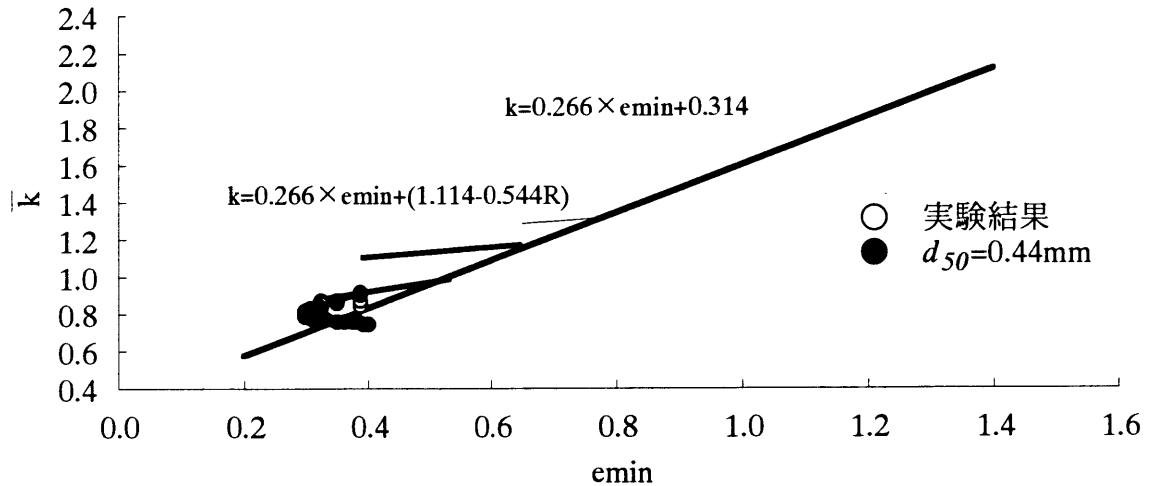


図-5.2.3 諸戸らのチャートにおける粒度評価径法の位置

図中の○印は下辺・諸戸のチャートに示された均等係数 U_c と50%粒径 d_{50} を用いて、60%、10%粒径 d_{60} 、 d_{10} を推定し、式(2.6.9)を適用して求めた値である。式(2.6.9)による最小間隙比 e_{min} が下辺・諸戸の最小間隙比 e_{min} に比べ小さくなり、彼らの実験値とは差が生じている。しかし、強度定数 \bar{k} と e_{min} の関係は彼らのラウンドネス $R=0.6\sim 0.8$ の傾向に類似している。そこで $d_{50}=0.44\text{mm}$ として均等係数 U_c を変化させてプロットしたのが●印である。この図より均等係数 U_c が $U_c < 10$ の範囲にあれば最小間隙比 e_{min} と強度定数は減少し、 $U_c > 10$ になると最小間隙比 e_{min} と強度定数は増加していくことを示している。下辺・諸戸らの $\bar{k}\sim e_{min}$ チャート図に示された実験データは均等係数 $U_c < 10$ の範囲に限られている。この範囲であれば、式(2.6.9)、(3.2.4)による推定結果も下辺・諸戸らの関係式とややズレてはいるが同じ傾向にある。従ってさらに均等係数が大きくなれば下辺・諸戸らの傾向とは異なった方向の関係になることを予想させる。

図-5.2.4は50%粒径 d_{50} と均等係数 U_c を種々変えた場合の強度変化を予測したものである。なお、ここで使用した粒度は模擬粒度であるため、 d_{50} と U_c をまず与え、式(5.2.5)より60%粒径 d_{60} を推定し、与えられた均等係数 U_c を用いて d_{10} を推定することによって式(3.2.4)を適用した。

$$d_{60} = (1.3\sim 1.7) d_{50} \quad (5.2.5)$$

図より $\bar{k} \sim e_{min}$ チャート上では推定式は平行であり，50%粒径が大きくなると上方(k が大きくなる方向)に平行移動していくことがわかる。下辺・諸戸が提案する関係式はラウンドネス R により平行移動することを示している。しかし，図-5.2.4では粒度の大きさによっても変化することが予想される傾向を示している。

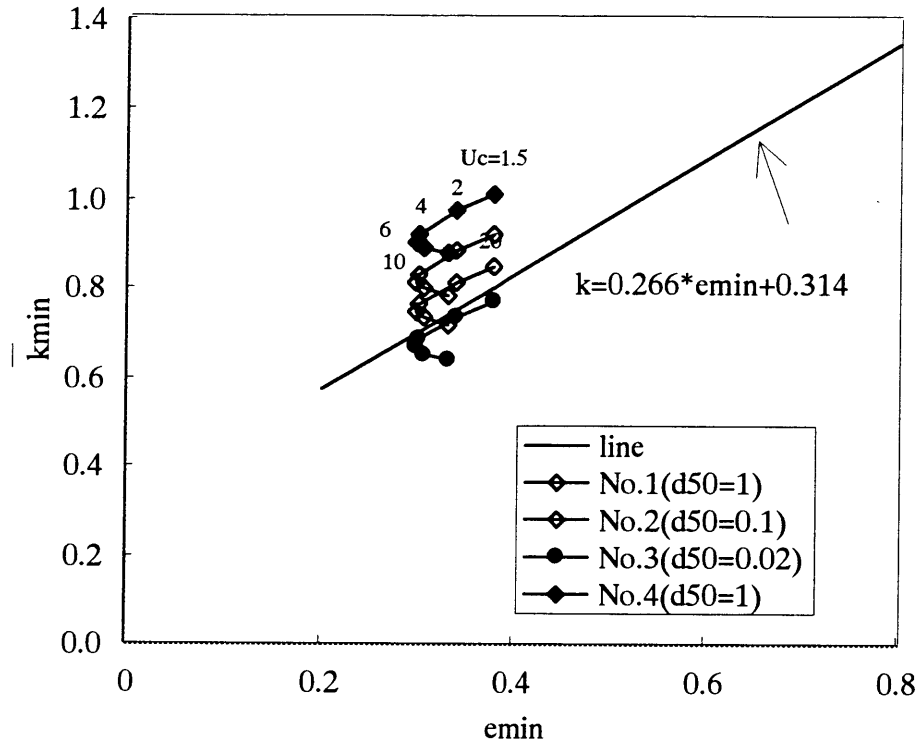


図-5.2.4 粒径を変えた時の推定式

5.3 土質の深度方向不均一性の粒度評価径法による表現

5.3.1 粒度から推定した透水係数の利用

4.3 章では式 (3.2.3) 及びCreagerの推定式は広範囲な粒度に対して透水係数の概略的な値を知ることであれば適用できることを示した。また、10%、20%粒径 d_{10} 、 d_{20} が求められない粘土に対しても、滑らかな曲線であれば適用することは可能であることを示した。一般に現場の透水性を知る上では現場揚水試験から求められる値が最も精度が高いとされている。しかし現場の地層は複雑であり、揚水試験で求められた値がどの層の透水係数に対応しているか、あるいは本当に平均的な透水係数かは分からないことが多い。しかし、本研究で明かにしたように粘性土にも透水係数の推定式が適用できることを利用して、図-5.3.1、5.3.2のような管理図を作成し、複雑な地盤の分布特性を評価することができる。これは粘性土、砂を問わず粒度分布と間隙比から求めた推定透水係数～深度分布図に圧密試験及び現場透水試験から求めた結果を併記したものである。この図では透水係数が深度方向に複雑に変化しているが、現場や室内試験結果はほぼこの変化に対応していることがわかる。図中の■印は試験データの粒度分布と間隙比を用いて計算した推定値である。粘土の間隙比は圧密試験結果による圧密降伏応力に対応する値を選定した。従って粘土の実験値も圧密降伏応力付近の正規圧密条件に対応する値である。これに対し砂の間隙比は未知であるため、間隙比 $e=0.6$ と仮定して求めた。実験値は単孔式現場透水実験結果である。このように幅広い透水係数の範囲で推定値と実験値を比較すると複雑な地層の水理条件の変化が実感として評価できる。

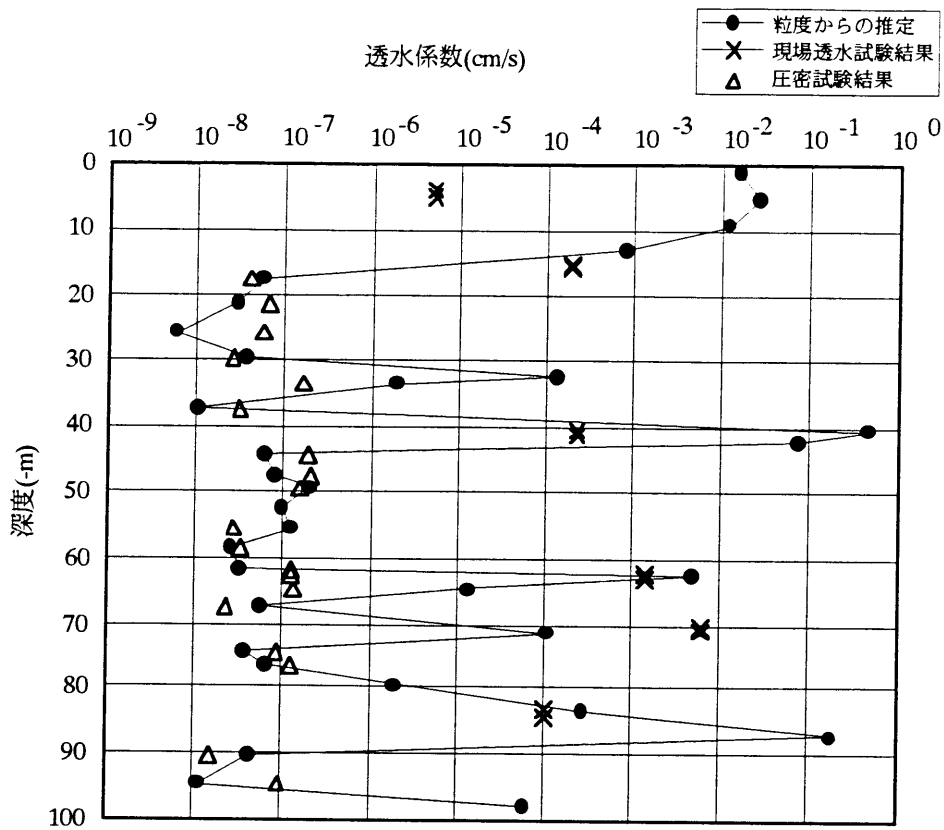


図-5.3.1 透水係数の深度方向分布例 (1)

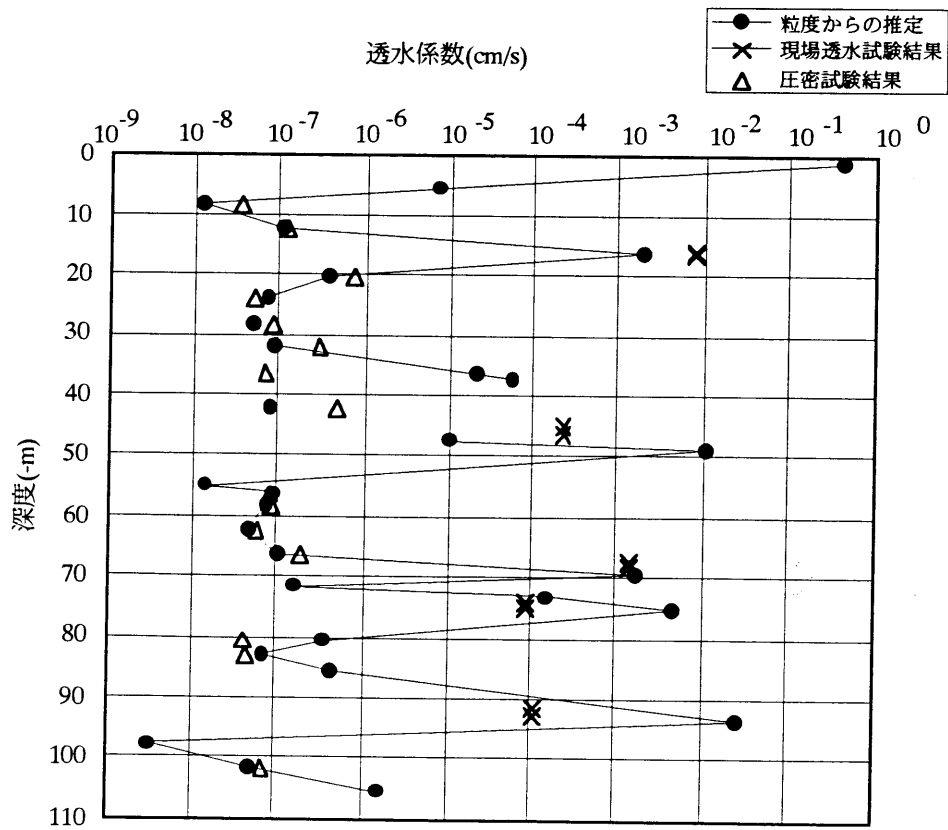


図-5.3.2 透水係数の深度方向分布例 (2)

5.3.2 粒度評価径と大阪層群の力学特性

大阪層群は段丘性堆積物で、地層の複雑な変化が予想される。このような地層の力学特性を表現する場合は、数個の力学試験だけで評価するのではなく深度方向の分布特性を考慮して工学的に力学特性を決める必要がある。この目的で図-5.3.3を作成した。この図はN値=20~40の部分はボーリング柱状図上では砂~砂礫として記載されているが、もし砂としてしまうと、斜面安定解析等では粘着項が無視されてしまう。ところが、粒度評価径 d_c は $d_c=10^{-4}\sim 10^{-3}$ (mm)と $d_c=10^{-2}\sim 10^{-1}$ (mm)付近にばらついている。これらの粒度評価径 d_c を図-3.5.1の施工管理図と比較すると前者のグループは細粒土、後者のグループは液状化の対象になる土に対応していることがわかる。従って一般に洪積地盤ではN値によって土性変化を表現する調査が実施されているが、上記したように粒度評価径 d_c を対応させて考えると土質特性が理解しやすい。

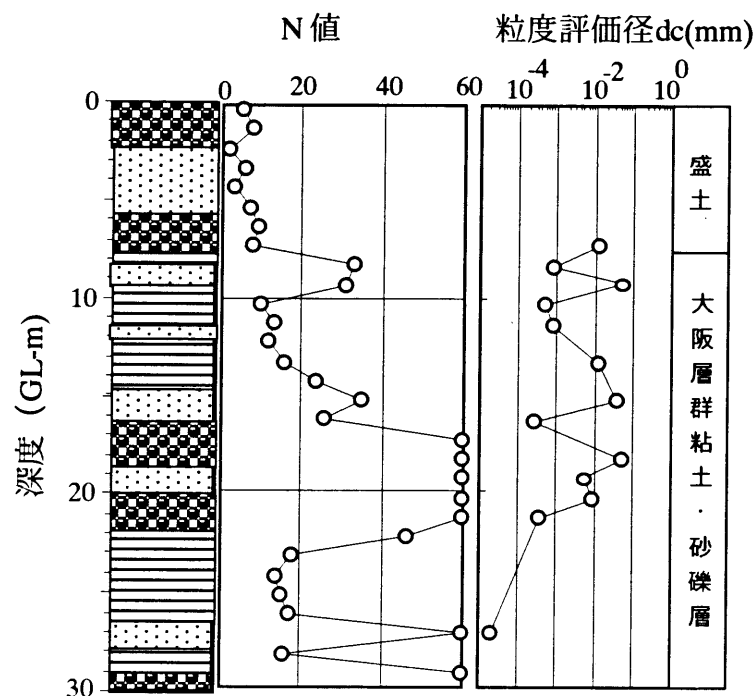


図-5.3.3 大阪層群と粒度評価径

また、粒度評価径法はN値の分布にも対応していることを示す。図-5.3.4は粒度評価径 d_c とN値の関係を示したものである。図から $d_c > 5 \times 10^{-2}$ (mm)の粒度評価径 d_c の範囲ではN値は大きくばらついているが、粒度評価径が大きくなるとN値も増加する傾向が見られる。これに対し、粒度評価径 d_c が $d_c < 5 \times 10^{-2}$ (mm)では10以下のN値が多くなり、しかも粒度評価径の減少に伴ってN値も減少する傾向が見られる。

液状化強度の推定で用いられる50%粒径 d_{50} とN値の関係も、図5.3.5に示されるように傾向的には粒度評価径とN値の関係に類似し、 $d_{50} = 0.1$ mmをN値の大部分が10以

下になるか否かの境界にすることができる。

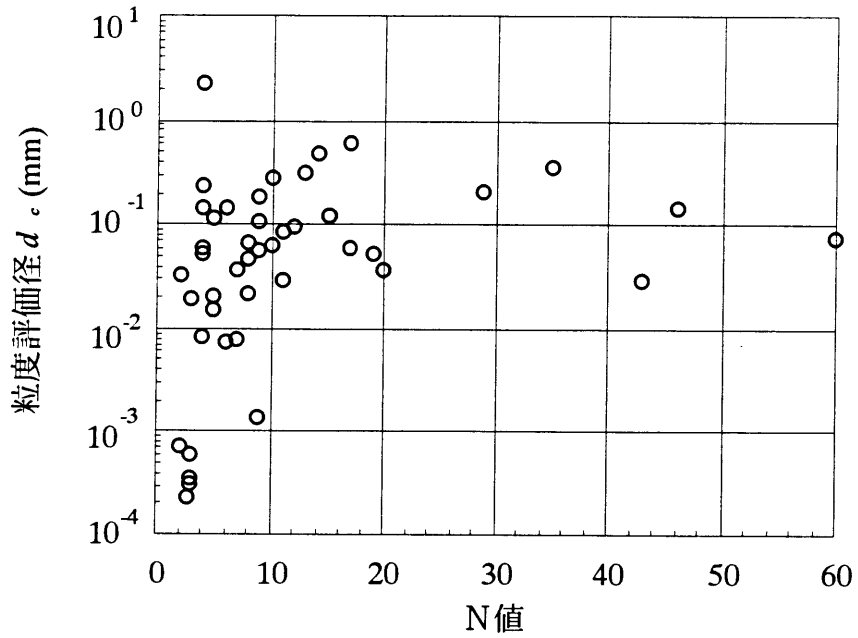


図-5.3.4 粒度評価径とN値

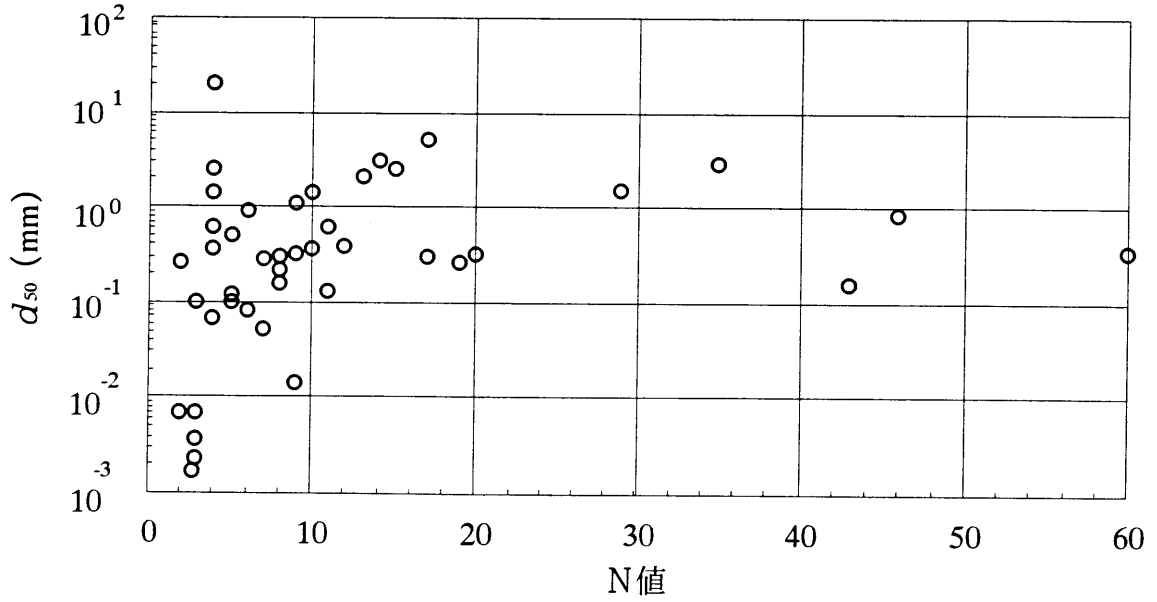


図-5.3.5 N値と d_{50}

細粒分含有率とN値の関係は、図-5.3.6に示されるように細粒分含有率が20%以下ではN値のばらつきはかなり大きいですが、細粒分含有率が20%以上になればN値は10以

下になり，ばらつきは小さくなる。つまりN値と細粒分含有率による特性分岐点を細粒分含有率20%とすれば，表-4.2.2に示す粒度評価径 $d_c=1 \times 10^{-2}$ (mm) が対応する。

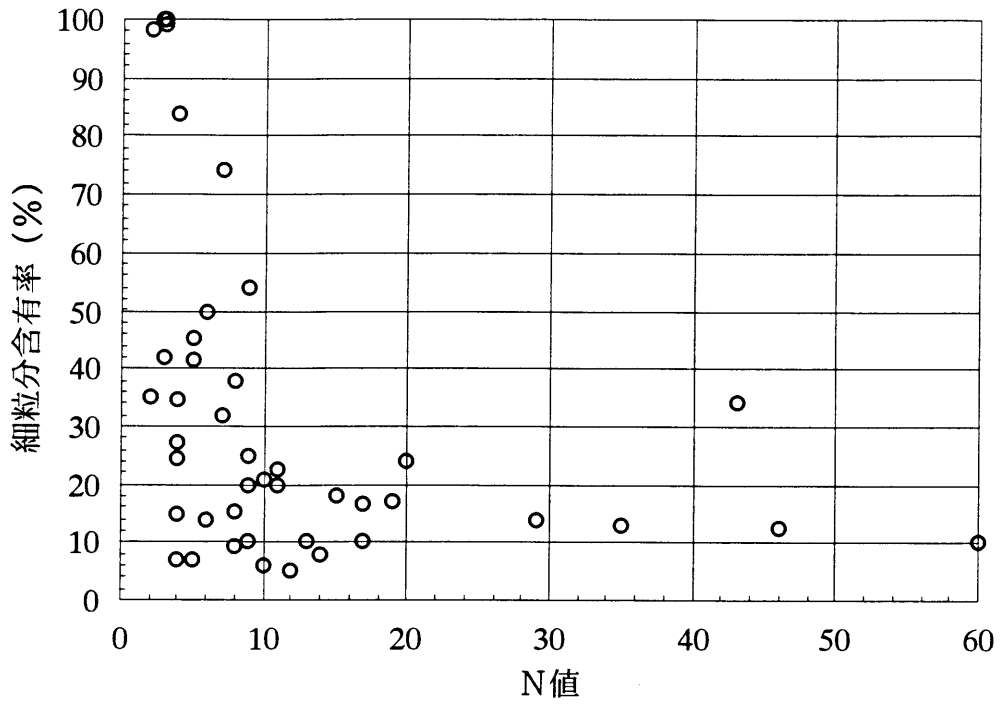


図-5.3.6 細粒分含有率～N値

図-5.3.4でも粒度評価径 d_c とN値の特性分岐点は上に示したように $d_c=5 \times 10^{-2}$ (mm)であるから，両者は類似した関係にあり，粒度評価径 d_c がN値の変化に関係していることを示している。また，図-3.2.6のCBR特性と粒度評価径 d_c の関係も $d_c=1 \times 10^{-2}$ (mm)を境に傾向が異っており，共通した傾向を示している。

図-5.3.7はN値の試験点に対応する粒度評価径から砂の間隙比 e を $e=0.6$ にして内部摩擦角 ϕ' を推定したものである。図には式(5.3.1)で示されるDunhamの推定式による推定値も付記してある。

$$\phi' = \sqrt{12 \cdot N} + 20 \quad (5.3.1)$$

この図よりDunhamの推定結果に対し提案式による推定値は約 5° 大きな結果が得られているが，N値が減少すれば ϕ' も減少する定性的な関係を得ることができ，Dunhamの推定式は粒度評価径法による推定値の下限值を与える傾向を示している。

以上の結果からN値と粒度評価径法も関係があることが分かった。従って粒度評価

径法による深度方向特性は内部摩擦角 ϕ' と透水係数 k の両者に関係しており、その有効性が示された。

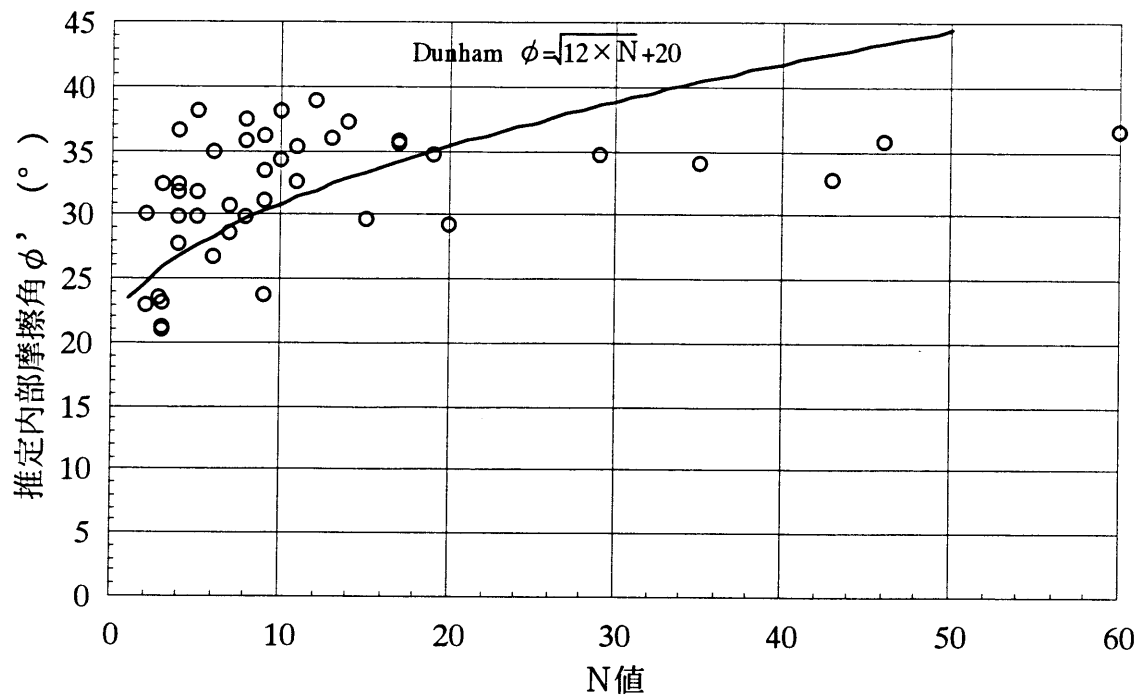


図-5.3.7 推定内部摩擦角 ϕ' とN値

5.4 液状化判定方法と粒度分布

5.4.1 粒度分布に基づく既往の液状化判定方法

簡易に液状化を推定する初歩的な方法は粒度分布による評価である。この手法は液状化検討の第1ステージに位置づけられており、日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説（1979）」⁹⁾等に見られる。港湾協会手法に示されている範囲を図-5.4.1に点線で示した。この判定基準は主として新潟地震、釧路沖地震、銚子沖地震等で液状化した粒度等が集積された結果であり、このようなゾーンの粒度分布の試料を用いた室内試験も多い。ところが自然地盤の粒度は非常に複雑である。液状化の検討を実施しようとする場合、基準に示された粒度範囲に一部しか重なっていない粒度によく遭遇する。この場合液状化可能性有りのゾーンに完全に包含されていないことを理由に液状化はしないという判断が示されるケースがある。

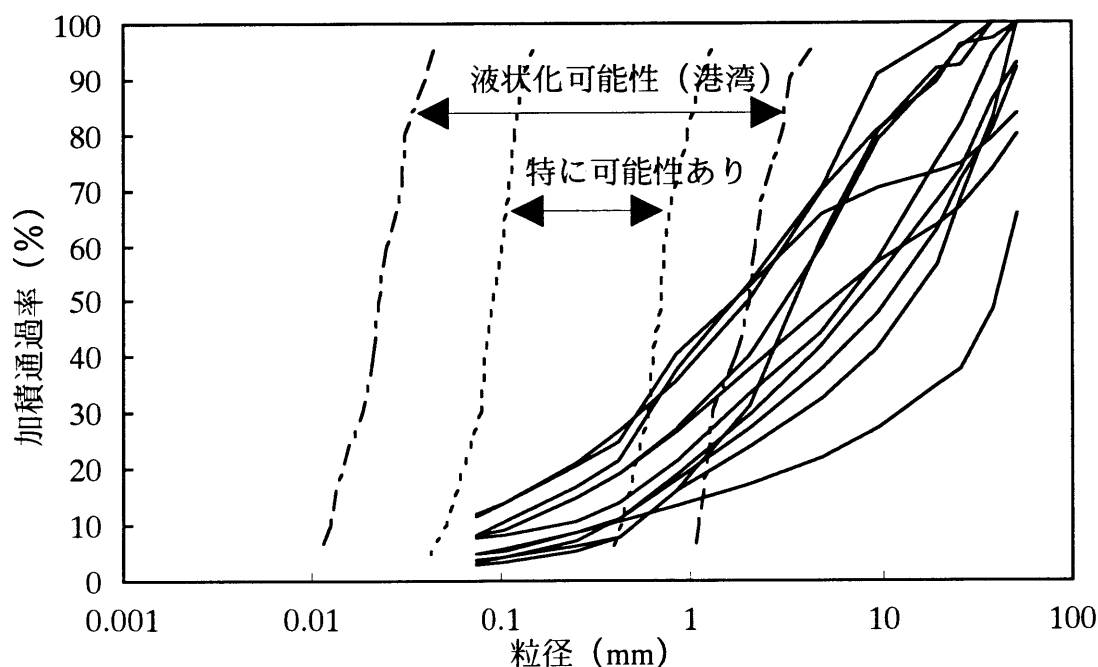


図-5.4.1 まさ土の粒度分布と従来の液状化範囲

つまり、粒度分布に基づく液状化判定方法は、粒度の差と力学的特性の差が正當に評価されず、単純な形態的な評価に留まっている。これに対し、日本道路協会¹⁰⁾等で示されている液状化推定式は式(5.4.1)～(5.4.4)で示され定量的な評価ができる。これらの式には粒度特性として50%粒径 d_{50} と細粒分含有率 F_c が、また相対密度で間隙状態

も含まれている。

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \quad (5.4.1)$$

$$R_1 = 0.0882 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v} + 0.7} \quad (5.4.2)$$

$$R_2 = \begin{cases} 0.19 & 0.02\text{mm} \leq d_{50} \leq 0.05\text{mm} \\ 0.225 \log(0.35/d_{10}) & 0.05\text{mm} \leq d_{50} \leq 0.06\text{mm} \\ -0.05 & 0.06\text{mm} \leq d_{50} \leq 2.0\text{mm} \end{cases} \quad (5.4.3)$$

$$R_3 = \begin{cases} 0.0 & 0\% \leq F_c \leq 40\% \\ 0.004 F_c - 0.16 & 40\% \leq F_c \leq 100\% \end{cases} \quad (5.4.4)$$

しかし、1995年兵庫県南部地震におけるまさ土の液状化は2つの液状化予測方法を再検討する契機になった。

図-5.4.1には兵庫県南芦屋浜の液状化現象が観察された兵庫県南芦屋浜のまさ土の粒度分布も実線で併記している。細粒側は液状化範囲に重なっているが、粗粒側は液状化ゾーンよりかなり粗粒側にある。このため粒度分布を比較する従来の方法で液状化粒度と判定することは困難であった。一方後者の判定法では粒度特性のなかで50%粒径 d_{50} だけに最大値が設けられていることが問題である。このため大礫を含むまさ土はこの上限値に比べると粗粒側になる材料が多く、この方法でも液状化は生じないことにされていた。兵庫県南部地震以降50%粒径 d_{50} の最大値の範囲が10mmに変更になり、また式の形状も若干変わったといえ、粒度特性の中で50%粒径 d_{50} だけに制約条件を設定する基本的な考え方は踏襲されている。

ところで、粒度評価径 d_c は粒径と細粒分の要因がひとつの因子であらわされる分類方法である。力学特性にも対応し、また土質の横断的な特性を把握する上で、共通したイメージを与えることは既に示した。本研究ではこの特徴を活かして液状化強度を推定するチャートを作成する。

5.4.2 液状化判定法と粒度評価径

これまで粒度分布を粒度評価径 d_c で代表させることにより透水係数 k や内部摩擦角 ϕ' と関係させる式を提案した。これらの関係を用いるならば日本統一土質分類法も一つのグループとしてではなく、分類間の壁のない連続量で示されることができるとを示した。また、粒度評価径 d_c によって上記に示した液状化の粒度分布だけではなく、サンドドレーンの砂や注入剤の選定等施工法の選定にも役立つことを示してきた。図-3.5.1では粒度と施工法の間を整理したが液状化が生じる可能性がある上限と下限の粒度分布を指数で示している。これで見ると液状化が生じる粒度の粒度評

価径 d_c は以下の範囲になる。

$$d_c = 3 \times 10^{-2} \sim 3 \times 10^{-1} (\text{mm})$$

従って例えば一部あるいは全て基準に示された液状化の発生する可能性のある粒度ゾーンからはずれる部分があったとしても上に示した粒度評価径 d_c の範囲にあれば力学的には類似した挙動を示すはずである。

表-5.4.1, 5.4.2は液状化範囲とされる上, 下限の粒度分布と, 図-5.4.2に示す代表的まさ土の粒度評価径 d_c を示したものである。これらの比較からまさ土は液状化範囲の上限付近にあたり, 粒度分布は粗粒側であるが, 粒度評価径 d_c が液状化範囲に類似していることから液状化範囲の土と類似した力学特性を示すことが予想される。

表-5.4.1 港湾基準液状化粒度範囲と分類指数

材料名	d ₆₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	粒度評価径 d_c (mm)
可能性あり (下限)	0.024	0.022	0.0125	4.95×10^{-3}
特に可能性あり (下限)	0.10	0.09	0.051	2.01×10^{-2}
可能性あり (上限)	2.15	2.0	1.1	4.44×10^{-1}
特に可能性あり (上限)	0.73	0.7	0.43	1.63×10^{-1}

表-5.4.2 南芦屋浜埋立柱材の粒度評価径 d_c

材料名	d ₆₀ (mm)	d ₅₀ (mm)	d ₁₀ (mm)	粒度評価径 d_c (mm)
A (風化花崗岩)	10.5	5.826	0.078	6.89×10^{-2}
B (風化花崗岩)	9.151	5.729	0.256	2.39×10^{-1}
C (風化花崗岩)	3.135	1.913	0.0557	5.36×10^{-2}

兵庫県南部地震におけるまさ土の液状化はこのことをまさ証明したものである。従って, 粒度評価径 d_c を用いれば液状化の発生する粒度がより力学的に示すことができることを意味している。

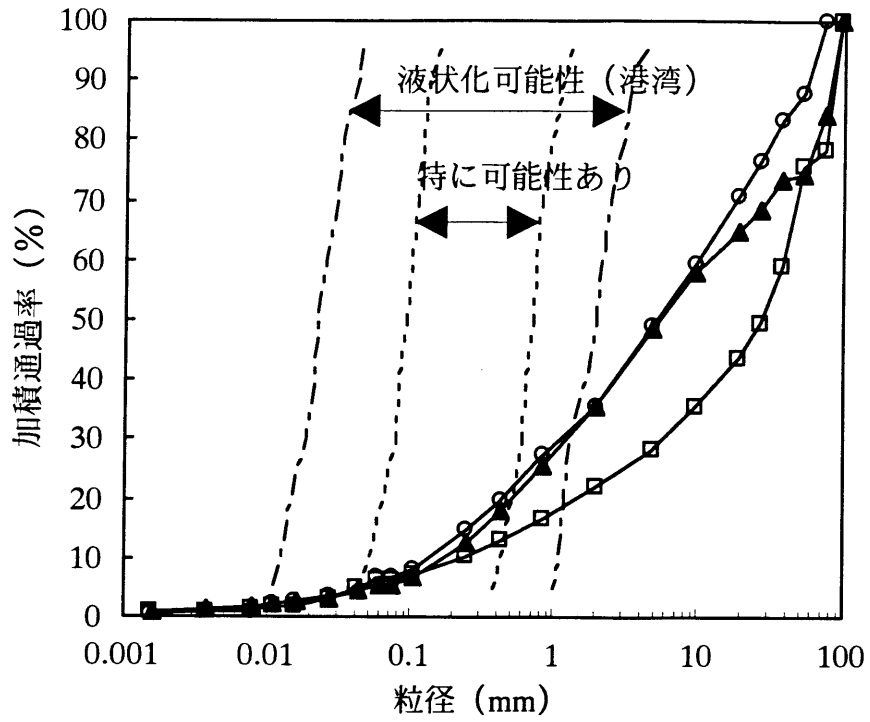


図-5.4.2 液状化した代表的まさ土の粒度分布

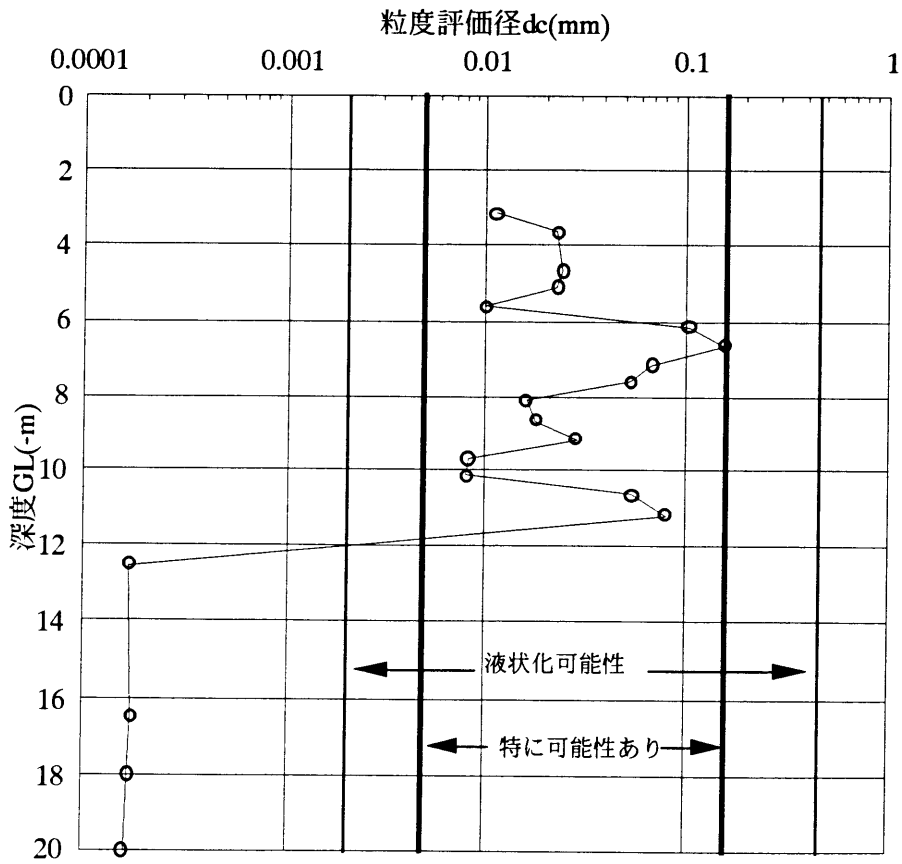


図-5.4.3 粒度評価径法における液状化判定深度図

図-5.4.3は5.2章で示した同様の方法を用いて液状化判定深度図として示したものである。粒度分布の局所的な形状比較ではなく、力学的な背景をもつ粒度評価径 d_e によって液状化判定が容易に評価できるので、図のように深度方向分布で示すと複雑な地層条件でも液状化評価が容易になり、第1段階の検討方法として有効である。しかし、今後の液状化対策では入力地震に対する可能性が検討される必要がある。このためには液状化強度を推定することが求められている。これについては次節で検討する。

5.4.3 液状化強度と粒度

式(5.4.1)～(5.4.4)で示される液状化判定方法に含まれる因子は相対密度、粒径、細粒分含有率の3つである。この中で強度に対する影響は相対密度が大きい。例えば式(5.4.1)の第1項 R_1 は式(5.4.5)が基礎になって展開されている。

$$R_1 = 0.0042 D_r \quad (5.4.5)$$

ここに D_r は相対密度でMeyerhofが提案した相対密度 D_r を与える式(5.4.6)の関係式が持ち込まれて R_1 の最終定義になる。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{\sigma_{v'} + 0.7}} \quad (5.4.6)$$

液状化を生じる緩い地盤の相対密度 D_r は普通60%～70%以下が多いと考えられるから $R_1 = 0.25 \sim 0.29$ になる。液状化を生じる土の液状化強度比は一般に $\sigma_v / 2\sigma'_v = 0.2 \sim 0.3$ であるから、上で示した相対密度の影響が大きいことがわかる。この相対密度に粒径の要因が加わる。粒径が大きいと最大0.19の強度比がプラスされる。ここで示す強度特性は静的強度の場合も類似している。相対密度が大きい程、また粒径が大きい程、静的強度も大きくなる。式(5.4.3)、(5.4.4)には細粒分含有率 F_c も含まれる。細粒分含有率 F_c が大きくなれば液状化強度も大きくなる。 $F_c = 100\%$ とすれば液状化強度比の増加分は0.24になる。細粒分含有率が増えることは粘着力や透水係数の減少に対応する。式(5.4.1)～(5.4.4)の液状化予測式は従って静的な強度と透水係数の2つの因子で代表させることができる。

図-5.4.4は粒度分布等の試験条件が表示された文献^{11)～33)}から液状化強度比を整理したものである。ばらつきはあるが液状化強度比0.2～0.4のコンターをひくことができる。基本的には繰り返し回数20回、ひずみ振幅2%、5%の強度を用いて図を作成した。

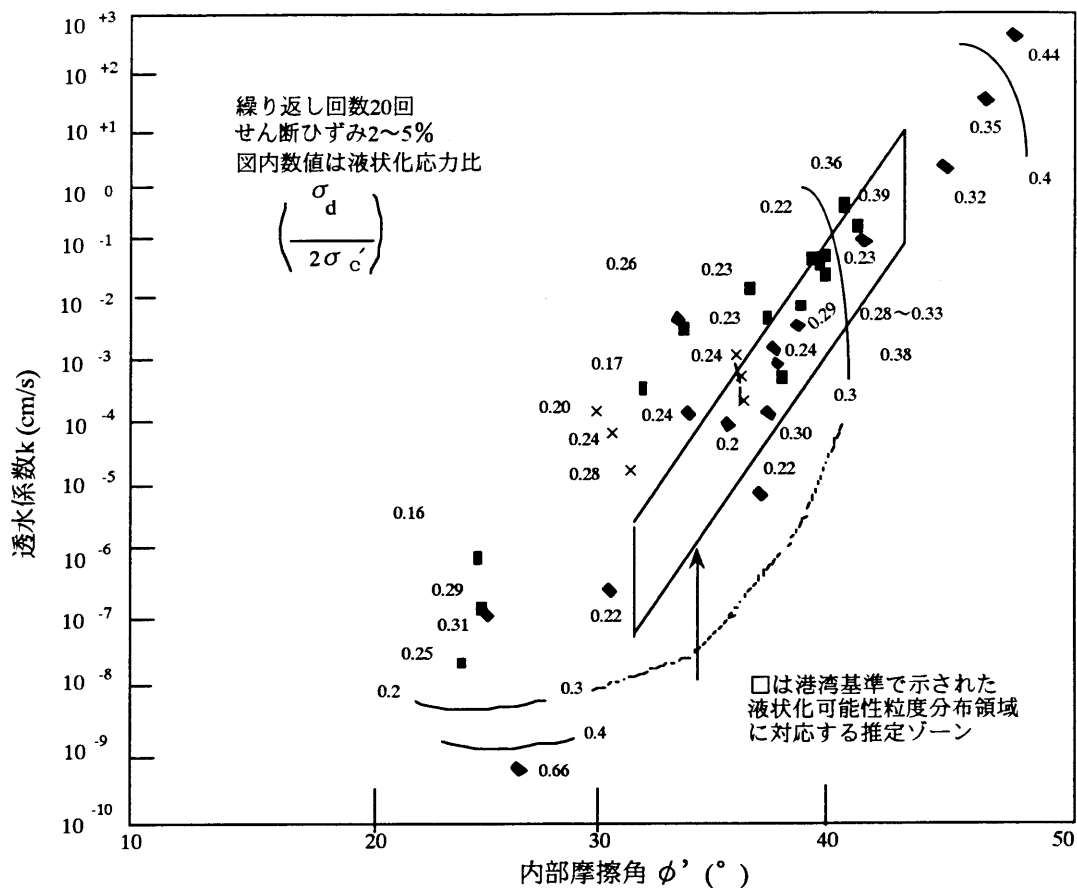


図-5.4.4 液状化強度と粒度評価法

表-5.4.3 まさ土の液状化強度

	d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	G_s	e	ϕ' ($^{\circ}$)	k (cm/sec)	$\sigma'_a/2\sigma'_c$
A	38.4	27.1	0.219	2.698	0.664	38.1	2.28×10^{-1}	0.30
B	9.758	5.01	0.133	2.708	0.734	37.3	3.18×10^{-2}	0.27
C	11.7	5.306	0.171	2.640	0.678	37.9	3.86×10^{-2}	0.28

液状化強度実験結果は一般に相当のばらつきがみられるが、内部摩擦角 ϕ' ~ 透水係数 k で整理するとこのばらつきは小さくなり、合理的な傾向がみられる。透水係数が一定で、内部摩擦角 ϕ' が大きくなれば液状化強度は大きくなり、内部摩擦角 ϕ' が一定で透水係数 k が大きくなれば、液状化強度は小さくなる傾向がある。後者の場合は透水係数が大きくなることは粒度分布上細粒分含有率が低下することを意味し、このため粘着力が小さくなり、液状化強度が小さくなることを表わしている

と考えられる。

前節では港湾基準に示される液状化の粒度範囲を粒度分布が部分的にはずれる場合の評価方法について検討し、粒度評価径による表示がより一般的な評価基準になることを示した。図-5.4.4には、先に示した港湾基準の粒度分布から推定した範囲も示してあるが、その整合性が裏づけられていると考えられる。表-5.4.3は代表的なまさ土の粒度特性とその粒度から推定される内部摩擦角 ϕ' と透水係数 k を示したもので、図-5.4.4からこれに対応する液状化強度を読みとったものである。図-5.4.3に示したマサ土の液状化強度は $\sigma_d/2\sigma_c' = 0.27\sim 0.30$ 程度である。

5.5 堆積環境と粒度評価径法

5.5.1 堆積環境の分類

図-5.5.1は文献³⁴⁾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 d_{50} 、均等係数 U_c 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(a)である。

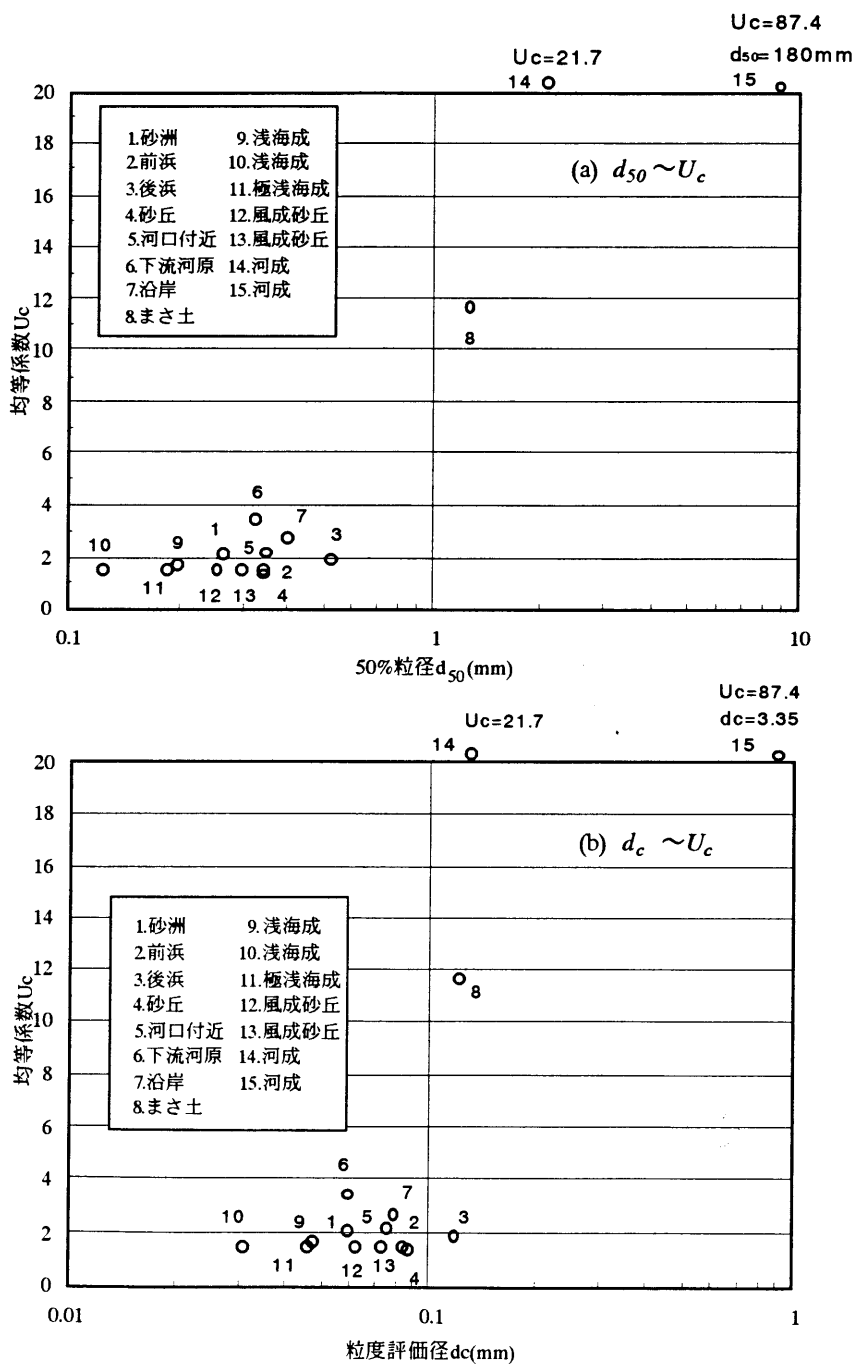


図-5.5.1 堆積環境と粒度評価径

2つの図から、50%粒径 d_{50} ～均等係数 U_c と粒度評価径 d_c ～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ことが分かる。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。また図(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 $(3 \sim 8) \times 10^{-3}$ (mm)で力学的にもグループ分けが可能である。従って、図(b)に示す粒度評価径 d_c だけでも力学的には図(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。

5.5.2 大阪湾岸の粘性土と釜山の粘性土特性の比較

大阪湾岸では地盤情報データベースを用いた地盤の土質工学的性質の研究が精力的に進められ、種々の角度から土の物理・力学的性質の間の相関性などについて研究されてきた³⁵⁾。一方、このようなデータを実務に利用する場合は、各土質間の平均的な傾向に注目しがちであるが、概略的な傾向の中に含まれるばらつきおよび適用限界を熟知しておく必要がある。この研究の一環として、「比較土質工学」と称して大阪湾のある埋立地と大韓民国釜山（以下韓国と記す）の土質をとりあげ、大阪湾全体の土質特性と比較することによってばらつきの背景を追求した^{36), 37)}。この結果、土質試験結果には人為的な影響があることや、釜山の土を中間土としてみると、日本の土質特性に比べて大きな違いはないことが明かになった。しかし、液性限界～粘土分含有率の関係では大阪湾の土質特性とは大きく異なり活性度に相異があることが指摘されている。

本章では粒度評価径法の立場から、大阪湾の沖積粘土と釜山の土を比較した結果を示す。

(1) 大阪湾岸と釜山の粘性土の物理特性

釜山の沖積粘性土は液性限界、塑性指数は小さいが図-5.5.2の塑性図に示すように大阪湾の粘土と同様A線より若干上側に分布し、CL～CHに分類される無機質な粘性土を主体としている。ところが、図-5.5.3では粘土分含有率は大阪湾岸の土と同じように10～80%であるが、液性限界は大阪湾岸の粘性土が30～100%に対し、釜山の粘性土の試験結果はNP～50%で、後者のコンシステンシーがかなり小さいことを示している。大阪湾岸の粘性土に関しては粘土分が増加すると液性限界も大きくなる傾向にあることを示している（図中Bゾーン）。しかし、粘土分含有量30～60%付近では粘土分が増加しても液性限界は増加しないグループ（Aゾーン）がみられるが、この全体的傾向に対するばらつきは人為的な原因であること、こうした傾向は特定の埋立地あるいは大阪湾岸全体でもみられることをが明らかにされている³⁶⁾。このこ

とはデータベースを利用する場合、一般的な傾向からはずれるばらつきが人為的なものか、純土質工学的な原因かを常に考慮しながら対処しなければならないことを示している。一方、釜山の土は粘土分が変化しているにもかかわらず、液性限界はあまり変化しない傾向を示している。しかし、大阪湾の粘性土にみられるばらつきと異なって、釜山の土は粘土分含有量に対する勾配が異なっているだけで、人為的なばらつきはみられない。

対象とした釜山の試料は図-5.5.4に示すように湾岸ではなくやや内陸側（洛東江河口から約30km上流の梁山市の南部の沖積低地）の土であるが、釜山の沿岸海底地盤の粘性土の液性限界はNakudong river（洛東江）河口で20～60％，Sumjin river 河口で40～80％という研究³⁹⁾があり、土質試験の対象とした釜山の土と類似した特性を示している。同様な傾向はソウル近傍の京畿平野でもみられ、粘性土の液性限界は25～45％，シルト分含有率は23～43％と報告されている³⁹⁾。このように、図-5.5.2，5.5.3に示した釜山の粘性土の土質は韓国では一般的な特性と考えられる。

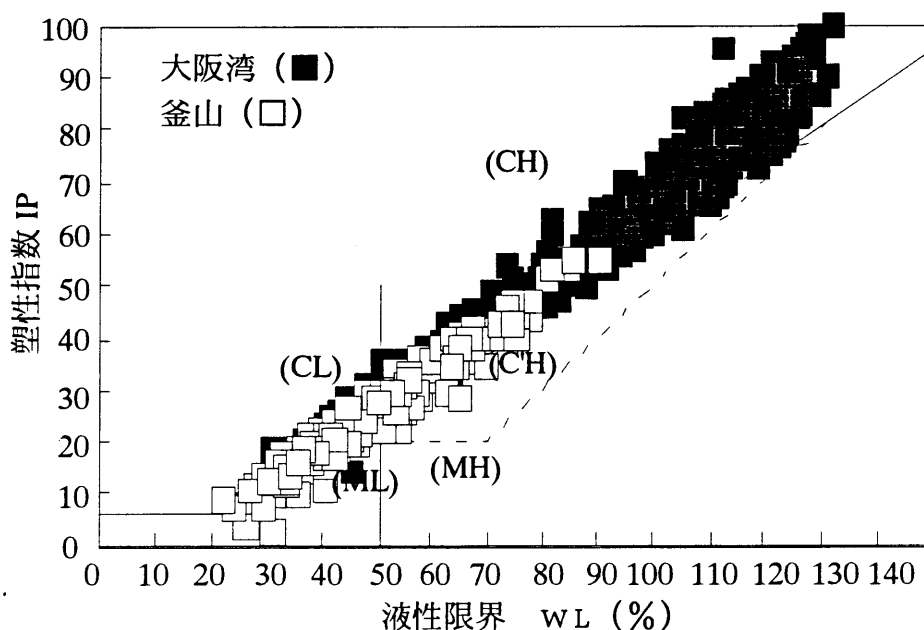


図-5.5.2 大阪，釜山粘性土の塑性図

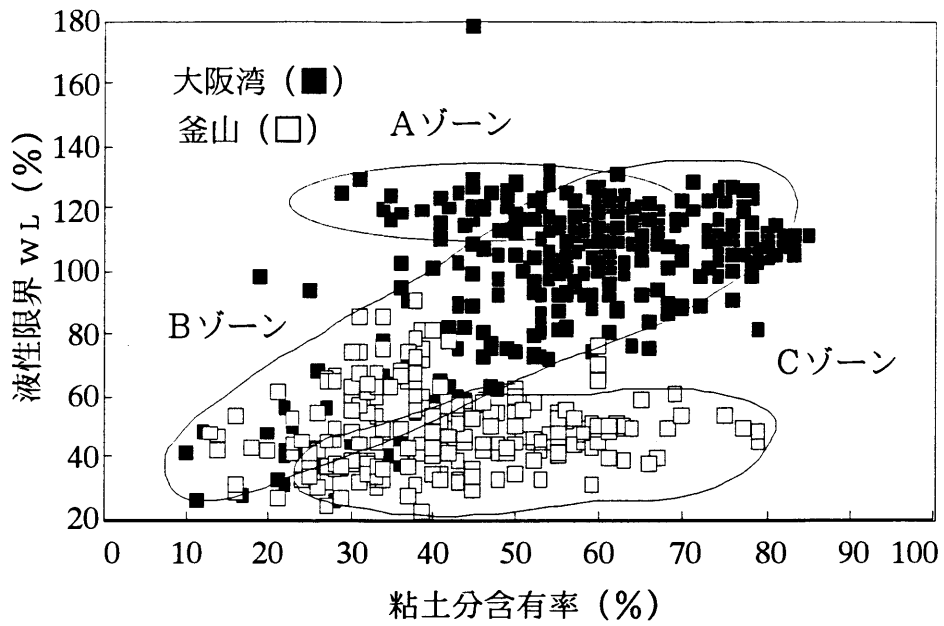


図-5.5.3 粘土分含有率と液性限界

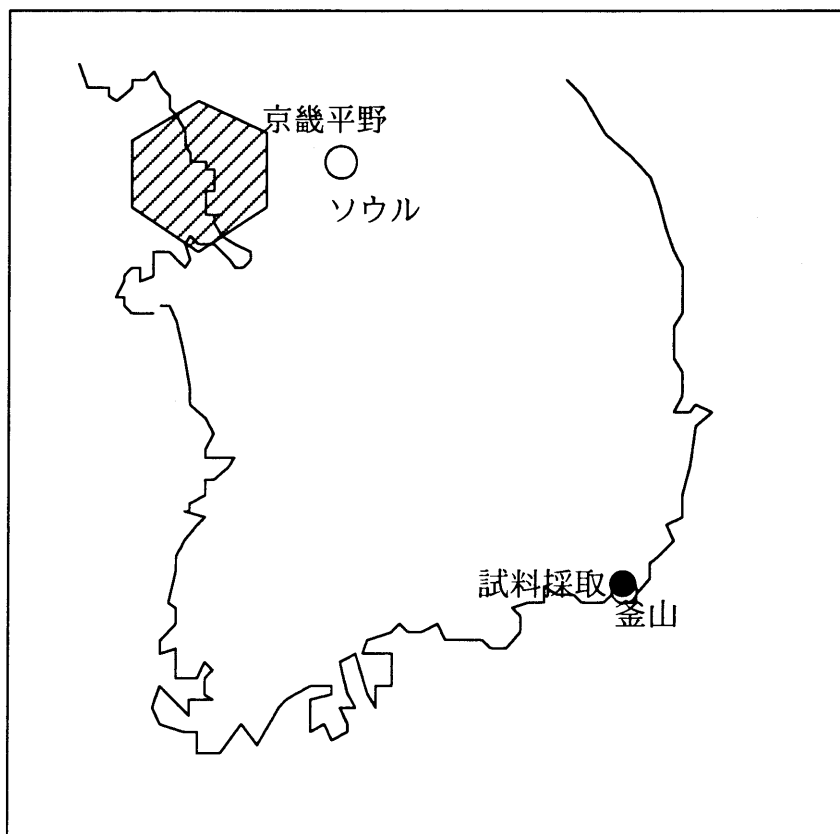


図-5.5.4 釜山の粘性土の採取位置

(2) 中間土の定義と両地域の粘性土

中間土の土質分類は細粒分、塑性指数等を用いて表-5.5.1のように提案されている⁴¹⁾。この基準を適用すると、図-5.5.3に示されるように釜山の土は粘土分含有量が10～80%と広い範囲にあり粒度上は中間土に分類される部分が多く含まれている。

一方、図-5.5.2に示すように塑性指数もNP～50%と幅を持っているが、そのうち約50%は塑性指数25%以下の中間土に分類される。

表-5.5.1 中間土の定義⁴⁰⁾

砂分含有率	50～80%
塑性指数 I_p	NP～25%
透水係数 k	$10^{-7} \sim 10^{-4}$ cm/s
圧密係数 c_v	$10^{-1} \sim 10^1$ cm/min

圧密試験から求めた透水係数や圧密係数 c_v と塑性指数 I_p の関係を図-5.5.5～5.5.7に示す。これによれば、大阪湾岸の土に比べ、釜山の土の圧密係数 c_v や透水係数 k が大きく中間土の特徴を示していることが分かる。つまり、粘土分含有量を基準にすると大阪湾の粘性土と釜山の粘性土の差は小さいように見えるが、塑性指数 I_p を基準にすると大阪湾岸の粘性土に比べ釜山の土は明確にグループ化される。これらの図には中瀬ら⁴¹⁾、倉田ら⁴²⁾の混合土に関する室内試験結果による研究成果も併記しているが、これらとは整合の取れた性質を示している。こうした研究結果に対比すると大阪湾の土とは特性が異なっている釜山の土は、人工的に作成した中間土と同じような傾向を示す。すなわち、大阪湾岸の土は塑性指数 I_p が $I_p < 45\%$ くらいで塑性指数 I_p が小さくなれば、圧密係数 c_v が大きくなる傾向を示しており、釜山の土はこの傾向の延長上にあり塑性指数 $I_p < 30\%$ で急激に大きくなっている。このように釜山の土は粘土分含有量から予想される以上に、中間土としての特性が強いことがわかる。

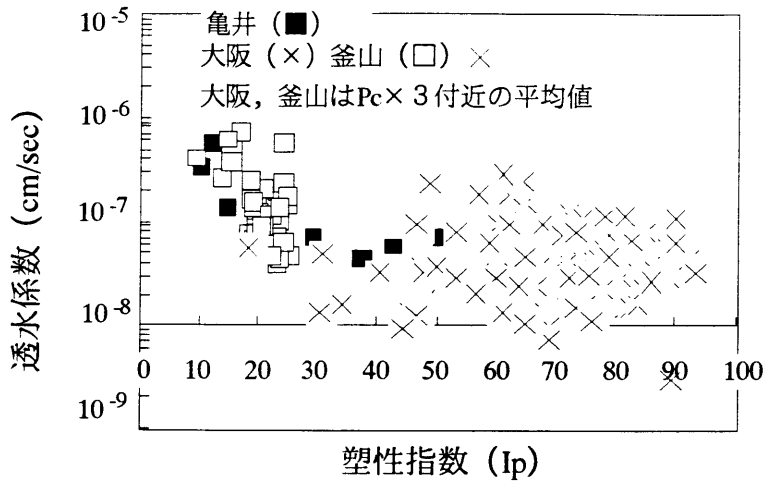


図-5.5.5 塑性指数と透水性係数

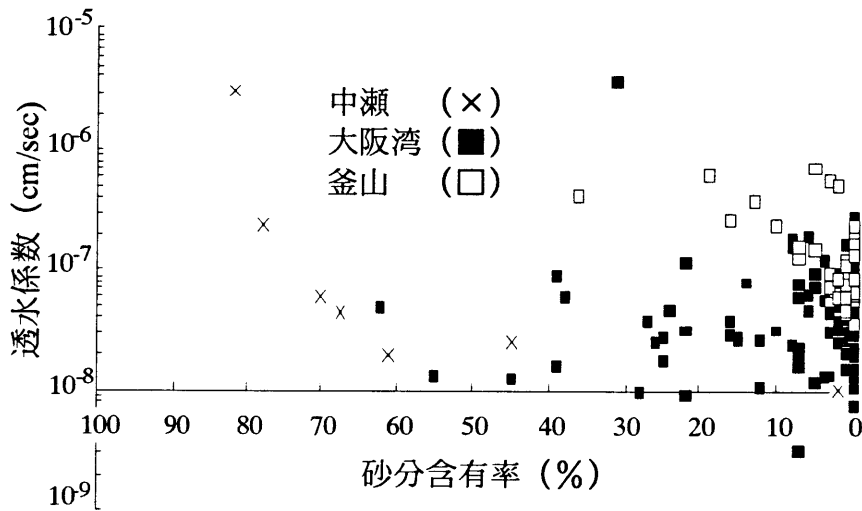


図-5.5.6 砂分含有率と透水性係数

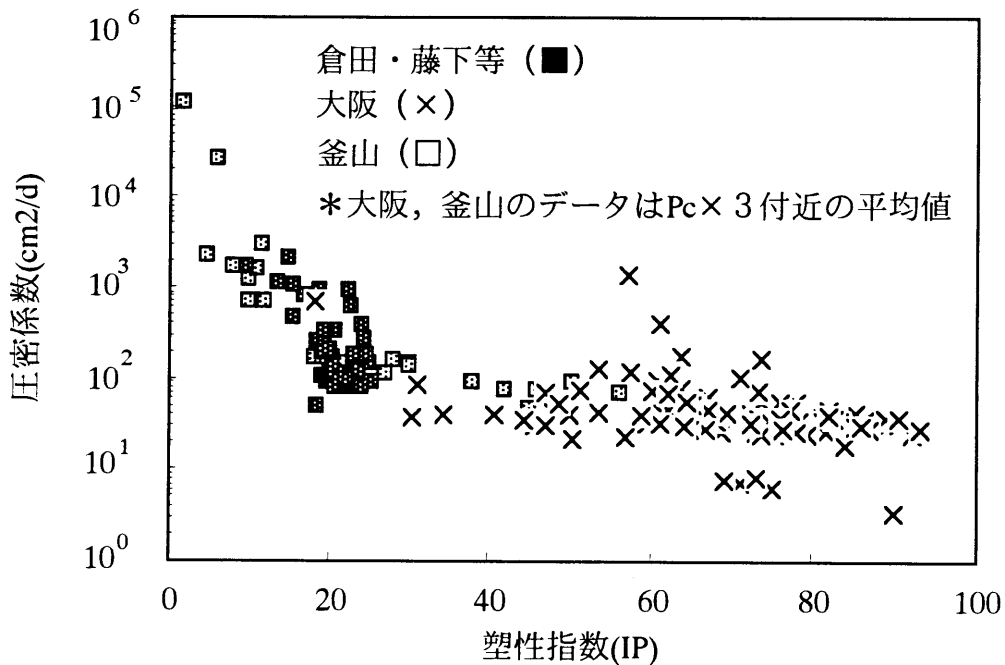


図-5.5.7 塑性指数と圧密係数

(3) コンシステンシー特性と粒度評価径

用いた試料は日本側4試料，釜山の土2試料である。粘度分布を日本側試験によって示したのが図-5.5.8，表-5.5.2である。これらの図，表からは大阪湾岸の試料の粒度分布に比べ，釜山の試料の粒度分布は粘土分がやや少ないことがわかる。

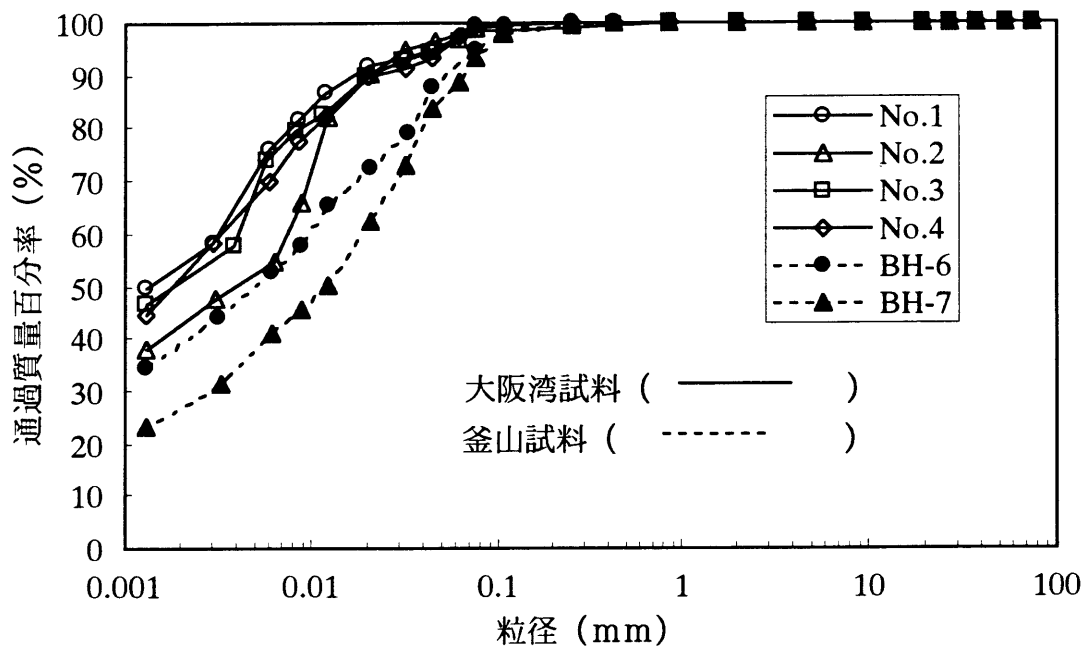


図-5.5.8 粘性土の粒度分布

表-5.5.2 粒度組成と粒度評価径

		砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)	粒度評価径 dc(mm)
大阪湾	No.1	0.6	27.8	71.6	1.63×10^{-4}
	No.2	1.0	46.7	52.3	5.12×10^{-4}
	No.3	1.5	30.4	68.1	1.83×10^{-4}
	No.4	0.5	32.7	66.8	3.04×10^{-4}
釜山	BH6	5.1	44.9	50.0	6.87×10^{-4}
	BH7	6.7	55.7	37.6	2.20×10^{-3}

表-5.5.3 コンシステンシー試験結果

場所	試料	日本側試験			韓国側試験		
		液性限界 wL (%)	塑性限界 wP (%)	塑性指数	液性限界 wL (%)	塑性限界 wP (%)	塑性指数
大阪湾	No.1	75.4	28.4	47.0	75.7	29.0	46.7
	No.2	82.4	33.4	49.0	77.4	30.1	47.3
	No.3	75.2	25.8	49.4	73.9	24.2	49.7
	No.4	76.4	27.6	48.8	70.4	24.8	45.6
釜山	BH6	34.1	20.3	13.8	36.9	18.3	18.6
	BH7	29.3	17.6	11.7	26.5	22.2	43.0

表-5.5.3に日本側と韓国側で行った土質試験結果を示したが、類似した結果を得ることができた。こうした粒度上の違いは粒度評価径 d_c を用いると定量的に示すことができる。大阪湾の粘性土の粒度評価径 d_c は $(1\sim 3)\times 10^{-2}$ (mm)に対し、釜山の粘性土は $(0.6\sim 2)\times 10^{-1}$ (mm)である。図-3.5.1の施工法選定図で比較すれば、粒度評価径 d_c が大きい釜山粘性土はやや粗粒側の特性を示すことが予想できる。

図-5.5.9、表-5.5.3は粒度評価径 d_c と液性限界 w_L の関係を整理したものである。釜山のデータ数が2個であるが、大阪と釜山の両地域のつながりをプロットすると、粒度評価径 d_c が $d_c=10^{-3}$ mm付近から急激に液性限界が小さくなる傾向がみられる。

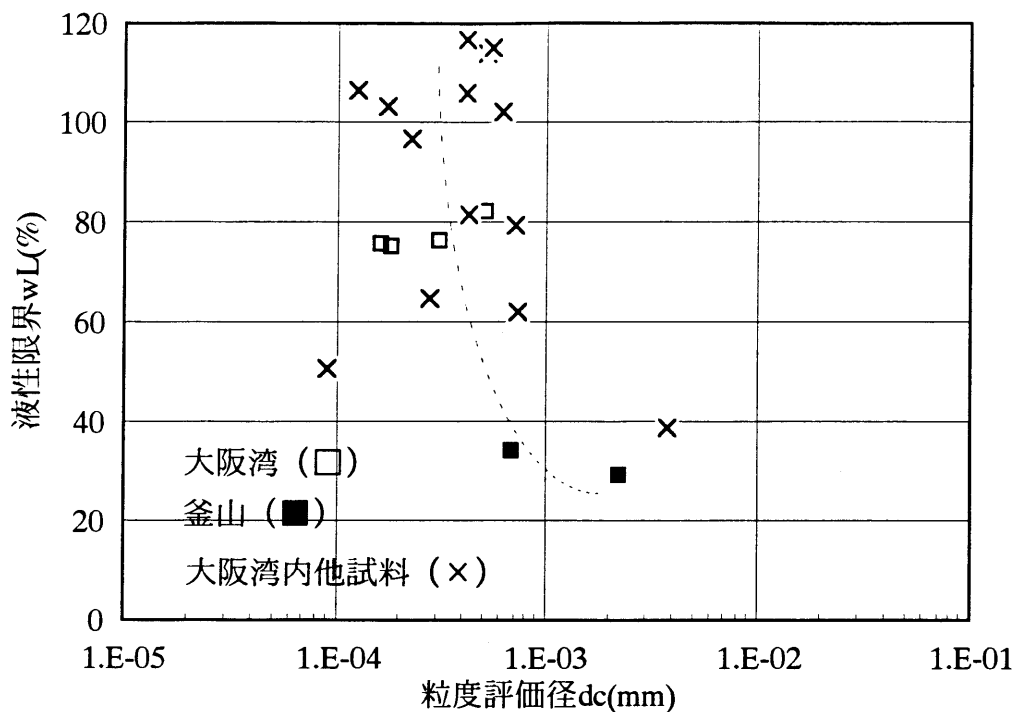


図-5.5.9 粒度評価径と液性限界

図-5.5.10は大阪湾と釜山の試験データを用いて活性度と粘土分含有量の関係を示している。ここに活性度は式(5.5.1)で示されるSkemptonの定義 $A_c^{43)}$ で求めた。

$$A_c = \frac{\text{塑性指数}}{(2 \mu\text{m以下の粘土分含有率})} \quad (5.5.1)$$

図は粘土分含有量が増加するに従い、若干活性度が小さくなる傾向を示しているが、この減少傾向は小さい。これに対し、大阪湾と釜山の粘性土の活性度の違いは大きく、表-5.5.3に示すように大阪湾の沖積粘土の活性度は平均1.740、釜山の粘性土の活性度は平均0.607である。

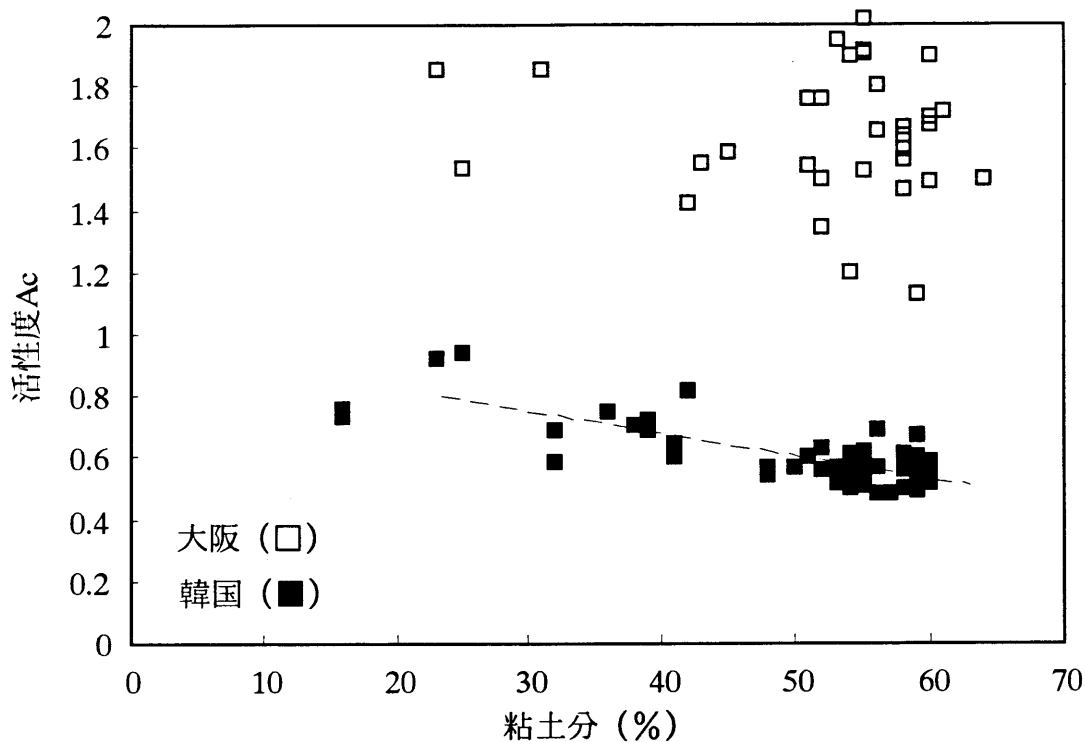


図-5.5.10 粘土分と活性度

表-5.5.3 活性度による比較

土の種類	平均	分散
大阪湾の沖積粘土の活性度	1.740	0.268
釜山の //	0.607	0.165

表-5.5.4 活性度による区分

分類	活性度 I_A
非活性粘土	<0.5
//	0.5 ~0.75
普通粘土	0.75~1.25
活性粘土	1.25~2.0
//	>2.0

表-5.5.4の活性度の分類区分に従うと普通粘土または活性粘土に属する値である。また釜山の活性土による分類は非活性粘土に属している。Skemptonの研究⁴³⁾と比較すればWeald clay ($I_A=0.63$)に類似した傾向を示している。また、純粋粘土鉱物の活性度は次のようにいわれている⁴⁴⁾。

カオリナイト 0.4~0.5
 イライト 0.5~1
 モンモロロナイト 1~7

これらの傾向から類推すると大阪湾岸の沖積粘土はイライト系やモンモロロナイト系の粘土分含有が多く、釜山の沖積粘土はカオリナイト系やイライト系の粘土含有

量が多いことが考えられる。大阪湾と釜山の粘性土の活性度は異なり、鉱物的な細成も影響していることを示した。しかし、図-5.5.10に示されるように活性度自体も粘土分によって異なる傾向が特に釜山の実験結果から予想される。これらの総合的な特性と粒度評価径の関係は今後の研究課題として残された。

以上のコンシステンシー特性と粒度評価径の関係の分析結果では、釜山の粘性土が大阪湾の粘性土に比べて中間土的特徴を有していることを示したが、粒度評価径 d_c を軸にすると、ばらつきはあるが両地域の土質特性は概略的ではあるが連続的傾向が認められた。

(4) 圧密透水係数と粒度評価径

図-5.5.11、5.5.12は大阪湾岸と釜山の粘性土に関する圧密係数を圧密圧力で整理したものである。図中の圧密係数は一次圧密比で補正しない値を用いている。また、釜山のデータに示した $\log t$ 法はCasagrande法で、曲線定規法ではない。図-5.5.11の大阪湾岸の粘性土は過圧密状態では大きな値を、正規圧密領域では過圧密状態の値に比べ、急激に低下するが、圧密圧力とともに若干大きくなる傾向を示している。これに対し釜山の例はばらつきが大きい、圧密圧力の増加に伴った圧密係数は増加する傾向と低下する傾向及びほぼ一定の傾向が見られるが変動幅は小さい。

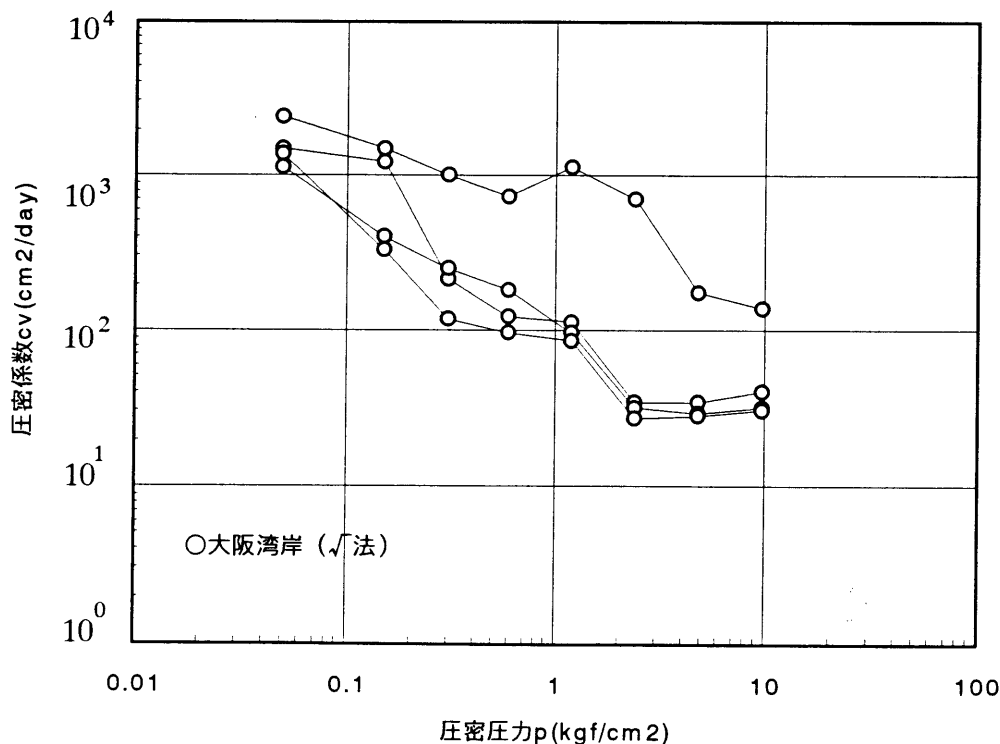


図-5.5.11 大阪湾岸粘性土の圧密係数

また、釜山の粘性土では $\log t$ 法による値が \sqrt{t} 法値に比べて小さい傾向を示している。図-5.5.13は液性限界と正規圧密状態の圧密係数を比較したものである。 \sqrt{t} 法による大阪湾岸の圧密係数は液性限界が小さくなれば大きくなる傾向を示している。一方、釜山の粘性土だけでは液性限界と圧密係数の関係は明らかではないが、両地域を並べて示すと、釜山の土は大阪湾岸の粘性土の特性の延長線上にあることは明らかである。両者を比較することによって、釜山の粘性土の位置づけが可能となる。しかし、 $\log t$ 法による圧密係数は大阪湾岸の傾向に比べ小さな値になっている。

図-5.5.14, 5.5.15は大阪湾岸と釜山の粘性土の圧密透水係数を対数で整理したものである。

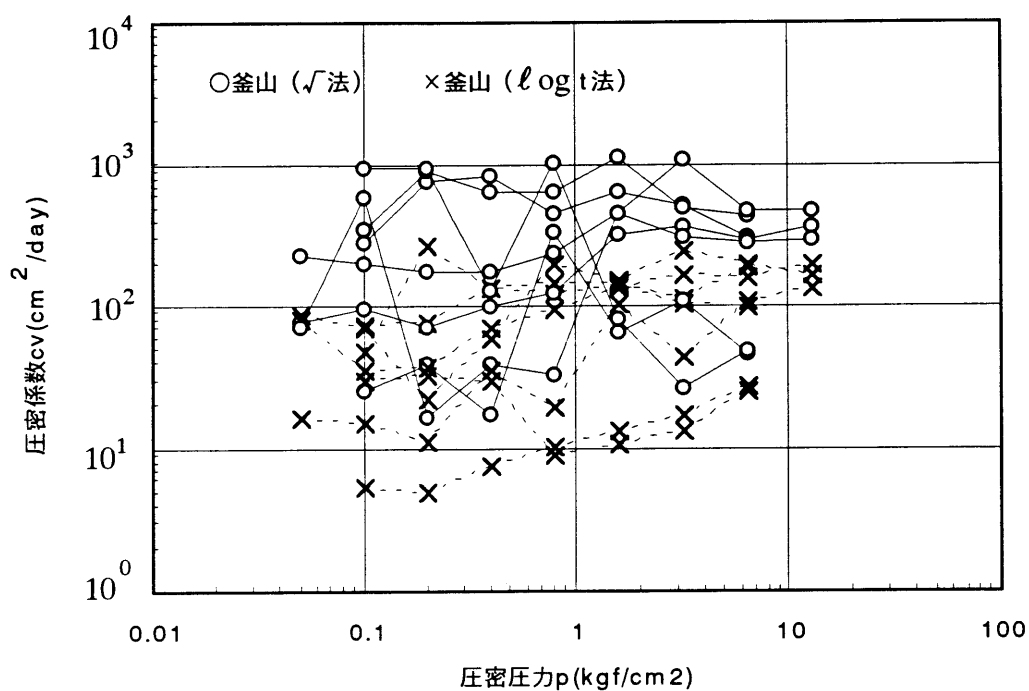


図-5.5.12 釜山粘性土の圧密係数

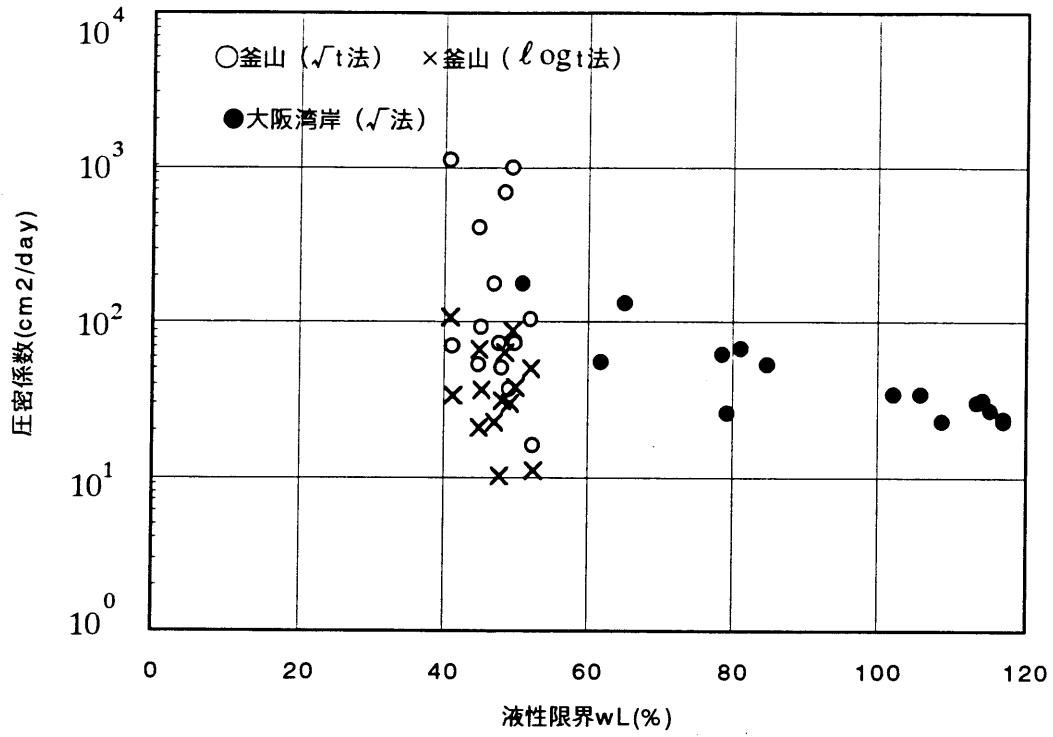


図-5.5.13 液性限界と圧密係数

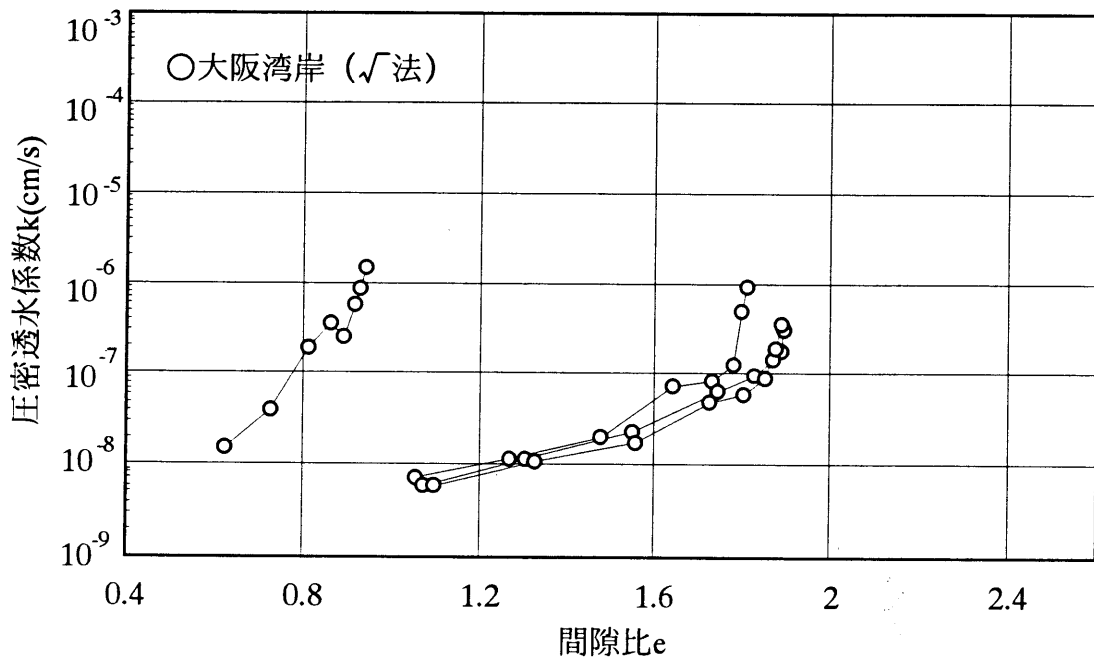


図-5.5.14 大阪湾粘性土の間隙比と透水係数の実験結果

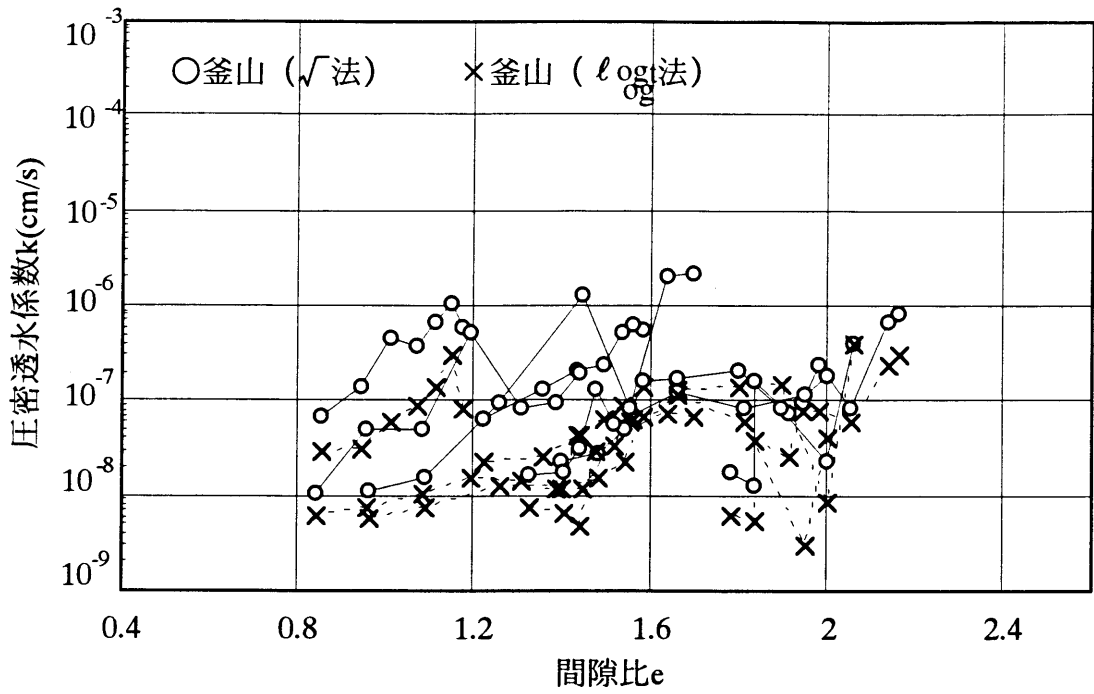


図-5.5.15 釜山粘性土の間隙比と透水係数の実験結果

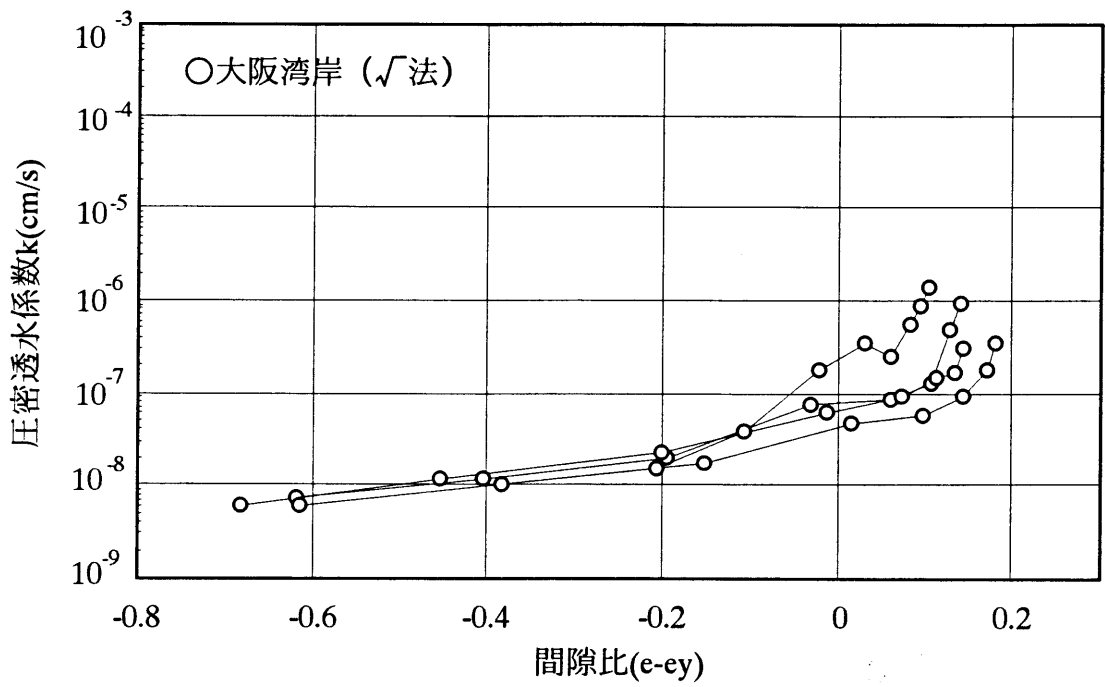


図-5.5.16 大阪湾粘性土の圧密条件による透水係数特性

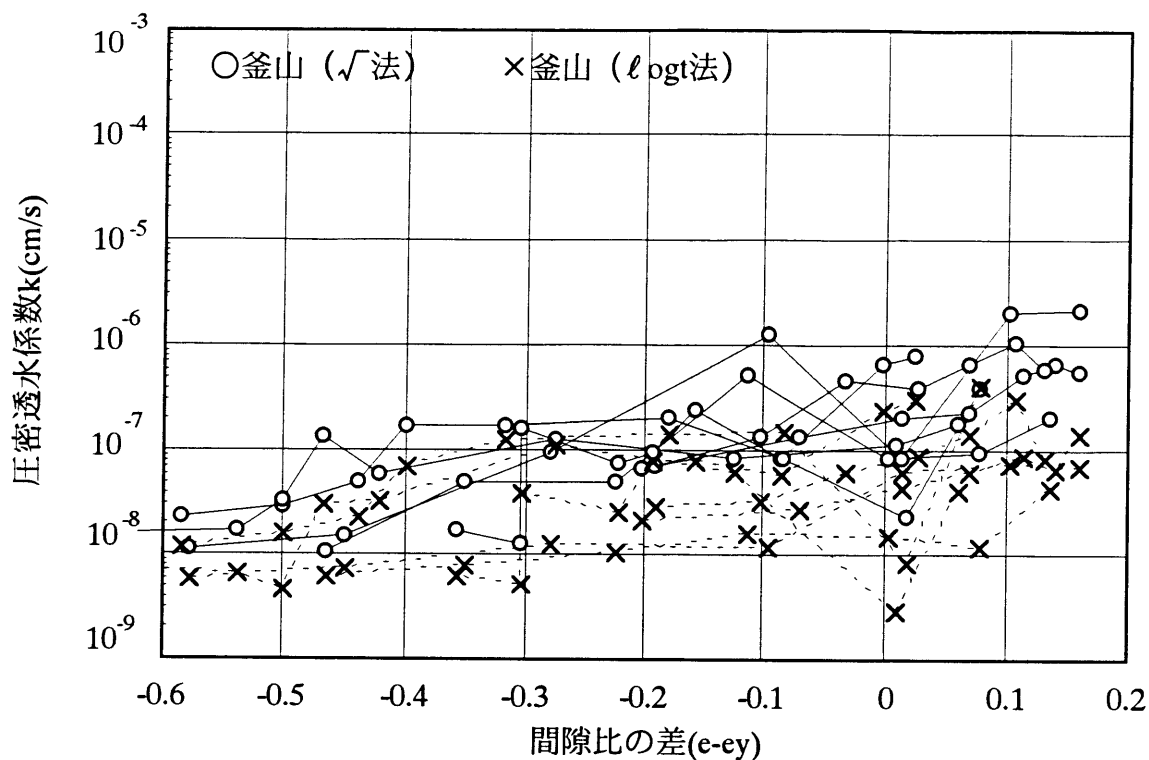


図-5.5.17 釜山粘性土の圧密条件による透水係数特性

全体的な傾向から考えると両地域とも $e \sim \log k$ の間に比例関係が見られるが、大阪湾岸の試験結果の過圧密部分のデータがこの比例関係から大きく外れる傾向が見られる。この特性をより明らかにするため、圧密降伏応力に対応する間隙比を基準にして図-5.5.16, 5.5.17に整理した。大阪湾岸粘性土では $e - e_y \geq 0$ でのズレが目立つが、釜山の試験結果では過圧密部分も含めて比例関係が存在する傾向を示している。ここで e_y は圧密試験から得られた圧密降伏応力に対応する間隙比をさし、 $e - e_y > 0$ であれば過圧密部分、 $e - e_y < 0$ は正規圧密部分に対応する。従って大阪湾岸の過圧部分の比例関係からのズレの物理的な解釈が課題になる。

これまでの研究では、粘土の圧密透水係数特性を $e \sim \log k$ あるいはTaylorの式で整理されているが、これらは単純に実験結果を集積したもので、定量的な研究はなされておらず定性的な域をでていない。しかし、図-5.5.18, 5.5.19では粒度評価径法によって圧密試験結果に示されている間隙比を用いた推定値と圧密試験結果を対比しているが、図からは大阪湾岸の透水係数に対して明らかに釜山の値は大きい、粒度から推定した透水係数は実験値に対して両地域とも概略1オーダーの差の範囲に納まっている。従って両者の粘性土に対する推定式の適合度はよく、粘土の透水係数も粒度分布に支配されていることを示している。

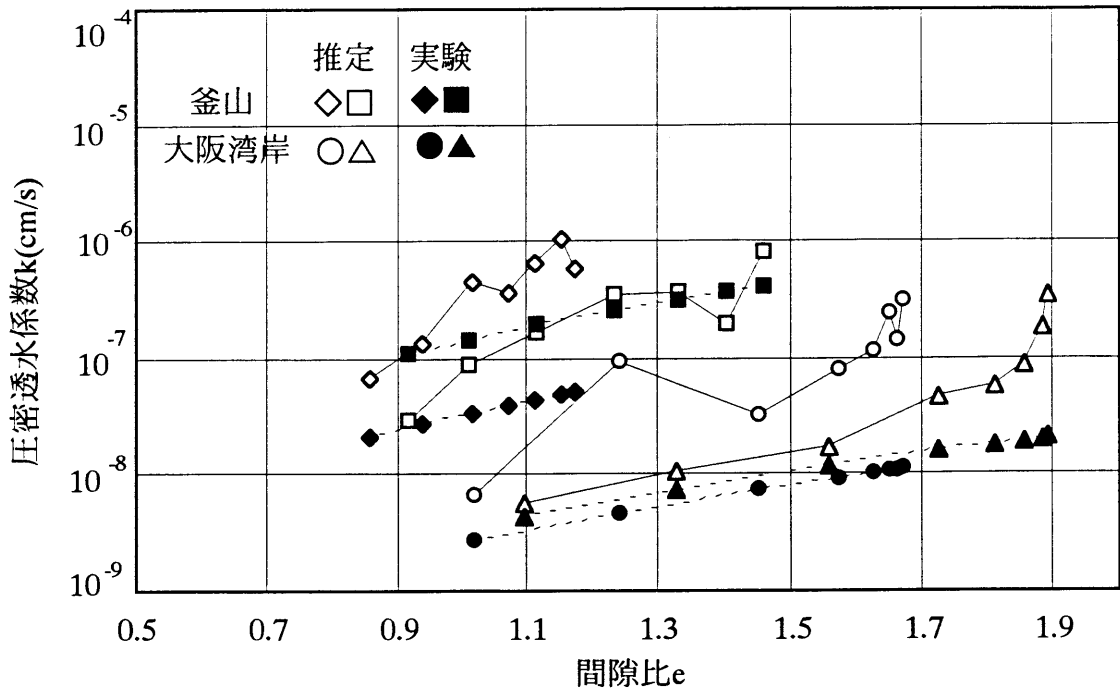


図-5.5.18 圧密透水係数と間隙比

図-5.5.18は $e \sim \log k$ 関係で、白抜き印は実験結果、黒印は粒度から推定した結果を示している。大阪湾岸粘性土の過圧密部を除くと、粒度から推定した結果は実験結果と対応していることがわかる。

図-5.5.19は粒度から粒度評価径法によって推定した推定値と圧密試験結果を比較したもので、大阪、釜山の粘性土の推定値は実験結果に対し1オーダー以内の範囲にある。また、図-5.5.20は $k \sim e^3/(1+e)$ のTaylorの関係を示したものである。この整理方法でも、粒度から推定した圧密透水係数は実験結果に対応しており、いずれの整理方法でも可能であることを示している。従って粒度から推定する方法も $e \sim \log k$ 関係やTaylorの関係と調和しており、正規圧密粘性土の圧密透水係数は粒度と相関が強いことを示している。また、圧密特性が大きく異なる大阪湾と釜山の粘性土の違いも粒度評価径により評価できることが明かとなった。

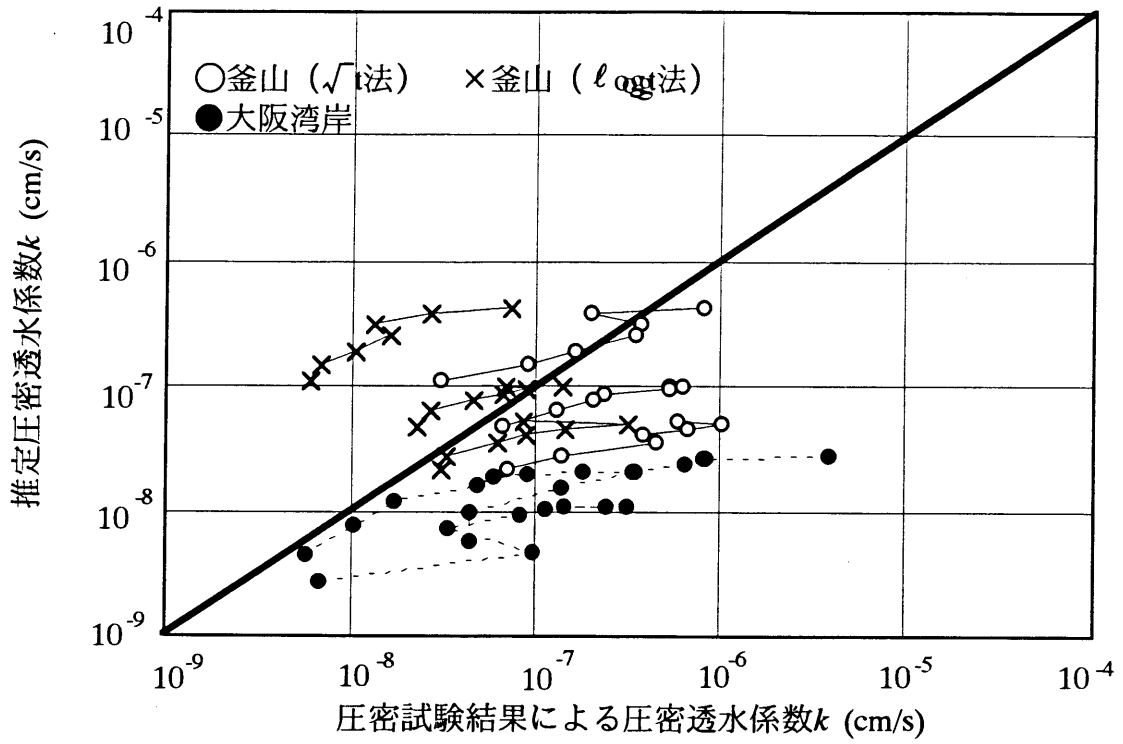


図-5.5.19 粒度評価径を用いた推定式と実験結果

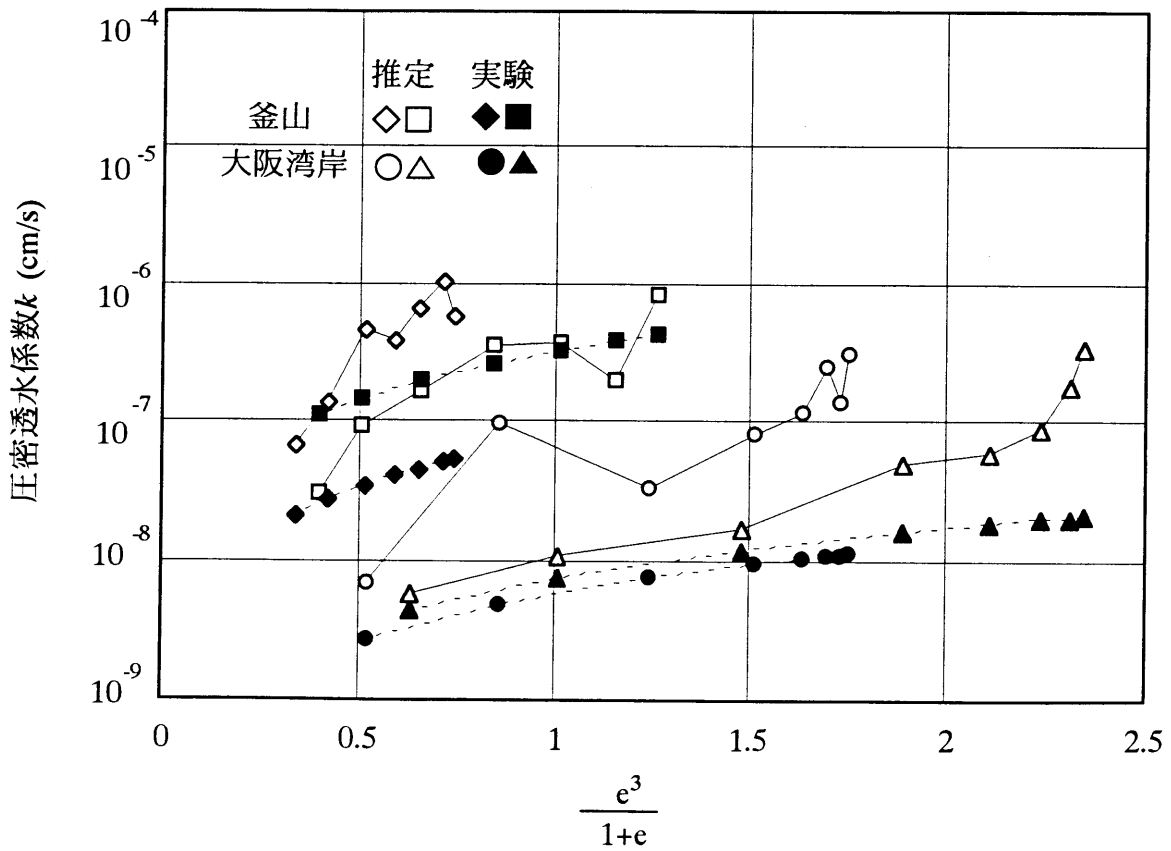


図-5.5.20 Taylorの式と圧密透水係数

5.5.3 礫質材の力学特性

大粒径を含む粗粒土の試験は一般に標準的な試験条件を越えており、原粒度のまま試験を実施することは困難がある。このため粗粒土の力学特性や密度特性のデータが不足することになり、種々のデータを収集して総合的な評価をくだす必要がある。しかし大礫を含む試験は精度に不安が残る。そこで粒度評価径法を介してデータの精度の評価も行なう必要がある。

本節で使用する礫を含む材料は図-3.4.1及び表-3.4.2に示す風化花崗岩である。以下にこれらを用いた土量変化率と内部摩擦角 ϕ' の試験結果の評価手法について示す。

(1) 土量変化率の試験方法と提案

大礫を含む土の土量変化率を求めようとする場合、最大・最小間隙比の管理図を基準にして、現場試験結果と、粒度調整した試料による室内最大・最小密度試験結果を評価すれば、データのばらつきや精度が評価できる。そして、この試験結果の傾向と一般的な傾向を比較することによって原粒度材料の土量変化率を推定すれば、精度の向上によることが期待される。そのフロー図を図-5.5.21に示す。

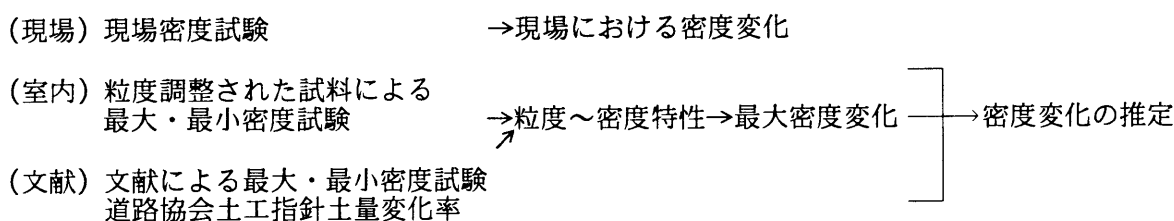


図-5.5.21 大粒径を含む粗粒土の土量変化率の推定方法

大粒径を含む粗粒土の試験用試料の準備は一般にある径以上の最大粒径だけをカットした尖頭粒度か、粒度曲線が平行になるように調整した相似粒度のどちらかの方法で行なうことが多い。試料作成の容易さから考えると尖頭粒度が適している、現場密度試験は大粒径が含まれているので、 $\phi 100\text{cm}$ 、深さ50～60cm規模の穴を掘りゴルフボール⁴⁵⁾を用いて行なう。室内の密度試験は調整した試料の最大粒径にあわせて $\phi 30\text{cm}$ と $\phi 10\text{cm}$ のモールドを用いる。最大密度試験は標準プロクターの締固めエネルギー $E_c = 5.63\text{cm} \cdot \text{kg}/\text{cm}^3$ で突き固めた密度とし、 $\phi 30\text{cm}$ の締固めに対してランマー落下1層5回、5層の突き固めを行う。最小密度は落下高さ2.54cmからモールド内に静かに注ぎ込むことによって求められる。こうして求められた密度試験結果は図-5.5.22～5.5.24のように整理し、既存データを基準に精度の評価を行なう。

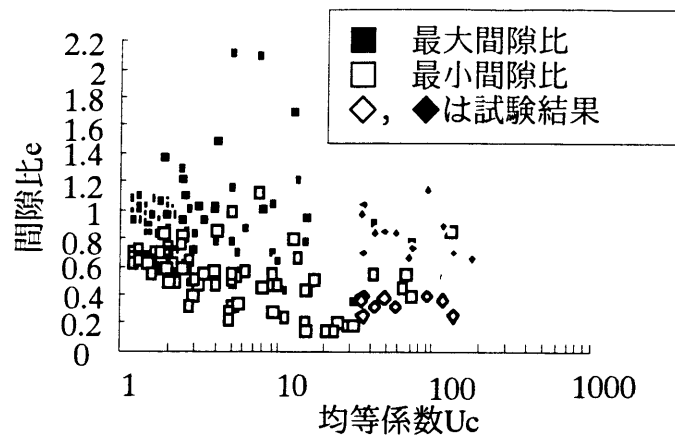


図-5.5.22 均等係数と最大最小間隙比

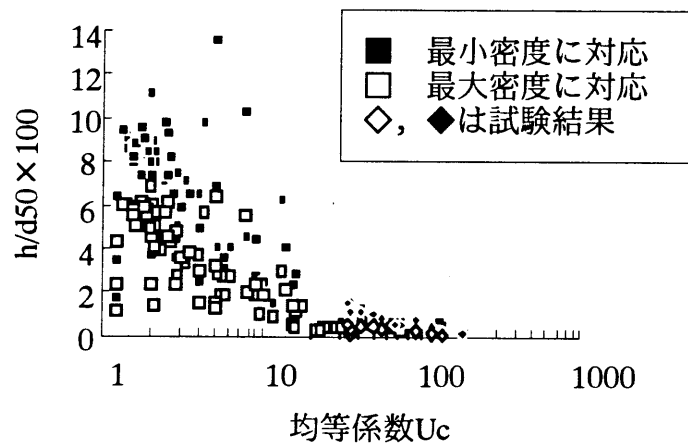


図-5.5.23 均等係数と構造指数

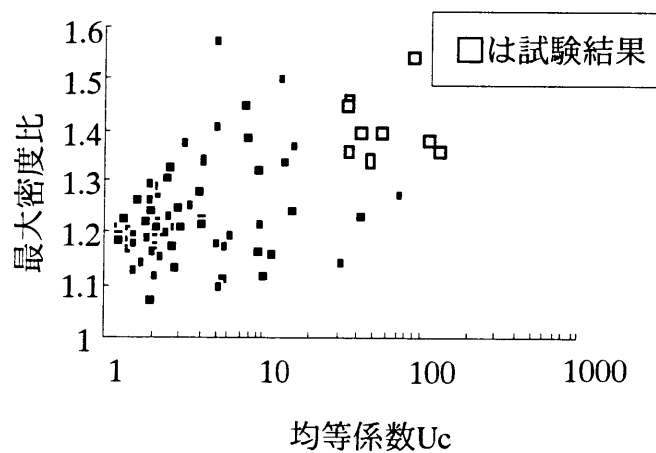


図-5.5.24 最大最小密度を用いた密度変化

このうち図-5.5.22と図-5.5.23については図-2.6.1～図-2.6.4のなかで分析している。

表-5.5.5は現場密度試験結果の一例で、密度変化比約1.2～1.3という結果が得られた。しかし、試験個数が限られているので一般化にあたっては、粒度のばらつきを考慮し、全体的な傾向を確認したうえで判断する必要がある。この一般化に2.6章で示した最大・最小密度特性が用いられる。

表-5.5.5 現場密度試験結果による密度変化

材料名	湿潤密度		乾燥密度		密度比
	運搬土 (g/cm ³)	埋立土 (g/cm ³)	運搬土 (g/cm ³)	埋立土 (g/cm ³)	
A産地	1.800	2.226	1.741	2.166	1.24
B産地	1.718	2.069	1.667	2.010	1.21
C産地	1.710	2.175	1.667	2.126	1.28

試料の粒度分布は均等係数 U_c が $34.5 < U_c < 175.4$ と広い範囲にあるが、図-5.5.22～5.5.24に示すように最大・最小密度の試験結果特性は一般的な傾向の延長上にあると判断される。この図-5.5.22では均等係数 U_c が10～20以下では均等係数 U_c が大きくなると最小間隙比 e_{min} は小さくなり、最小値0.2～0.4が凹状の底になり、均等係数 U_c が10～20以上になれば大きくなり0.4～0.6まで増加する傾向がみられる。また最大間隙比 e_{max} もばらつきはあるが、最小間隙比 e_{min} の傾向と類似しており、均等係数 U_c が20以上では0.8～1付近に収束することが予想される。また粒度評価径 d_c から求められる平均間隙径深 h についても、 h_{max}/d_{50} と h_{min}/d_{50} は小さくなり、かつ両者の差も縮まり、また均等係数 U_c が20以上になると収束傾向がみられる。

現場における密度比は最大・最小密度試験結果から予想される密度比以下である必要がある。原粒度も、このような特性を有すると仮定すれば、これらの範囲内に納まることが期待され図-5.5.23を参考にして決めることができる。例えば、原粒度の均等係数は68.4～175.4であり、対応する平均間隙径深 h を用いると表-5.5.6の右欄に示されるように、 $h_{max}/d_{50}=(0.25\sim0.65)\times 10^{-2}$ 、 $h_{min}/d_{50}=(0.18\sim0.49)\times 10^{-2}$ の範囲になる。 h_{max}/h_{min} が最大の土量変化率に対応しており1.2～1.5の範囲が得られる。表-5.5.6に示された試験結果はこの範囲に含まれる。さらにこの結論を補強するため表-5.5.7に示すように道路協会「土工指針」⁴⁶⁾の関係を整理した。対応する礫、礫質土の土量変化率は1.21～1.30であり、試験結果と類似した値になることがわかる。以上の結果から大粒径を含む粗粒土の土量変化率の算定あるいは現実験の補正に図-5.5.23が効果的であることがわかる。

表-5.5.6 平均間隙径深条件から推定される最大・最小状態

原粒度	比重 G_s	均等 指数 U_c	d_{50} (mm)	粒度 評価 径 d_c (mm)	最小 密度 g/cm^3 (現場)	最大 間隙比 e_{max} (現場)	h_{max}	h_{max}/d_{10} $\times 100$	図-5.5.22から 推定される 平均的な値	
									h_{max}/d_{50} $\times 100$	h_{min}/d_{50} $\times 100$
A	2.698	175.43	27.10	0.246	1.624	0.664	0.0605	0.223	0.25	0.18
B	2.708	73.22	5.01	0.108	1.562	0.734	0.0293	0.584	0.62	0.49
C	2.640	68.42	5.31	0.125	1.573	0.378	0.0321	0.604	0.65	0.41

表-5.5.7 密度の変化

名 称		L	L(mean)	C	C(mean)	L/C
岩または石	硬岩	1.65~2.00	1.83	1.30~1.50	1.40	1.30
	中硬岩	1.50~1.70	1.60	1.20~1.40	1.30	1.23
	軟岩	1.30~1.70	1.50	1.00~1.30	1.15	1.30
	岩塊・玉石	1.10~1.20	1.15	0.95~1.05	1.00	1.15
礫混じり土	礫	1.10~1.20	1.15	0.85~1.05	0.95	1.21
	礫質土	1.10~1.30	1.20	0.85~1.00	0.93	1.30
	固結した礫質土	1.25~1.45	1.35	1.10~1.30	1.20	1.13
砂	砂	1.10~1.20	1.15	0.85~0.95	0.90	1.28
	岩塊・玉石まじり砂	1.15~1.20	1.18	0.90~1.00	0.95	1.24
普通土	砂質土	1.20~1.30	1.25	0.85~0.95	0.90	1.39
	岩塊・玉石まじり砂質土	1.40~1.45	1.43	0.90~1.00	0.95	1.50
粘性土等	粘性土	1.20~1.45	1.33	0.85~0.95	0.90	1.47
	礫混じり粘性土	1.30~1.40	1.35	0.90~1.00	0.95	1.42
	岩塊・玉石まじり粘性土	1.40~1.45	1.43	0.90~1.00	0.95	1.50

(2) 粗粒材の強度と粒度の関係

大粒径を含む粗粒材の強度試験でも、粒度調整材料と原粒度の力学的差違に基づいて試験結果の補正は必要な場合がある。この場合試験粒度に対する試験結果の一般性を確認して、原粒度の強度を補正することになる。表-5.5.8は本提案式(3.2.4)で求めた大阪湾岸粗粒土の強度の推定値と実験値を示している。大阪湾岸の粗粒材は、 $\phi' = 30 \sim 50^\circ$ の範囲でばらついているが、提案式による推定値と実験値の差は平均 0.1° 、標準偏差 3.13° であり、提案式の有効性を示している。

表-5.5.8 大阪湾岸埋立材料の内部摩擦角 ϕ'

材料		推定 $\phi d (^{\circ})$	実験 $\phi d (^{\circ})$	推定差	
風化花崗岩	実験 A	36.9	41.3	-4.4	
	実験 B	38.9	40.9	-2.0	
	実験 C	36.0	38.8	-2.8	
大阪洪積砂礫 (文献47)		36.4	34.0	2.4	
		36.3	35.5	0.8	
		38.2	36.8	1.4	
		38.8	36.5	2.3	
大阪洪積砂礫 文献 (48)		34.1	36.4	-2.3	
		33.5	31.4	2.1	
洪積, 沖積砂礫 文献 (49)		36.3	34.6	1.7	
		38.7	45.0	-6.3	
洪積砂礫 (文献49)		38.8	42.5	-3.7	
		37.1	28.6	8.5	
大阪洪積砂礫 (文献50)		36.3	34.2	2.1	
		40.3	36.0	4.3	
淡路島風化花崗岩		38.7	37.2	1.5	
		A	39.0	38.0	1.0
			36.0	37.5	-1.5
		A'	36.3	34.3	2.0
			38.7	38.4	0.3
		B	39.1	38.4	0.7
			36.6	37.8	-1.2
		B'	37.0	34.0	3.0
淡路島頁岩 文献 (51)		39.8	37.8	2.0	
		39.6	37.3	2.3	
		39.4	36.9	2.5	
神戸 クラッシャーラン (文献51)		32.8	35.0	-2.2	
		45.2	49.0	-3.7	
		45.3	43.8	-3.7	
		45.3	41.5	-3.8	
		45.3	46.5	-0.7	
		45.3	43.5	-1.8	
神戸 クラッシャーラン (文献51)		45.3	41.5	-3.8	
		43.2	48.7	-5.5	
		43.2	44.2	-1.0	
		43.2	42.0	1.2	
		43.2	49.0	-5.9	
		43.2	44.4	-1.2	
まぎ土 (文献52)		43.2	41.7	1.6	
		37.8	40.0	-2.2	

5.5.4 名古屋熱田砂層の力学特性

名古屋都心部の建築工事では熱田砂層と呼ばれる洪積層に接する機会が多い。熱田層は5層の粘性土層を挟在する5～15万年前の堆積層である。このうち粘性土層の力学的、物理的特性については比較的研究されている。一方、基礎の支持層として、あるいは地下水位低下工法等の施工法を左右するのは熱田砂層である場合が多く、その特性も徐々に明らかにされてきている。

本研究では、熱田砂層の粒度分布の範囲を用いて、粒度評価径 d_c を介してその位置付けを試み、かつ粒度評価径 d_c から推定され内部摩擦角 ϕ' の分布特性を検討した。熱田砂層は堆積条件の違いにより上部、下部の2層に分類されている。各々の粒度分布は図-2.2.1に示した。図-2.2.1の粒径加積曲線から粒度評価径 d_c を計算し、粒度評価径 d_c の分布特性を整理してみたのが図-5.5.25で、均等係数が大きくなれば粒度評価径 d_c は小さくなる傾向がみられる。

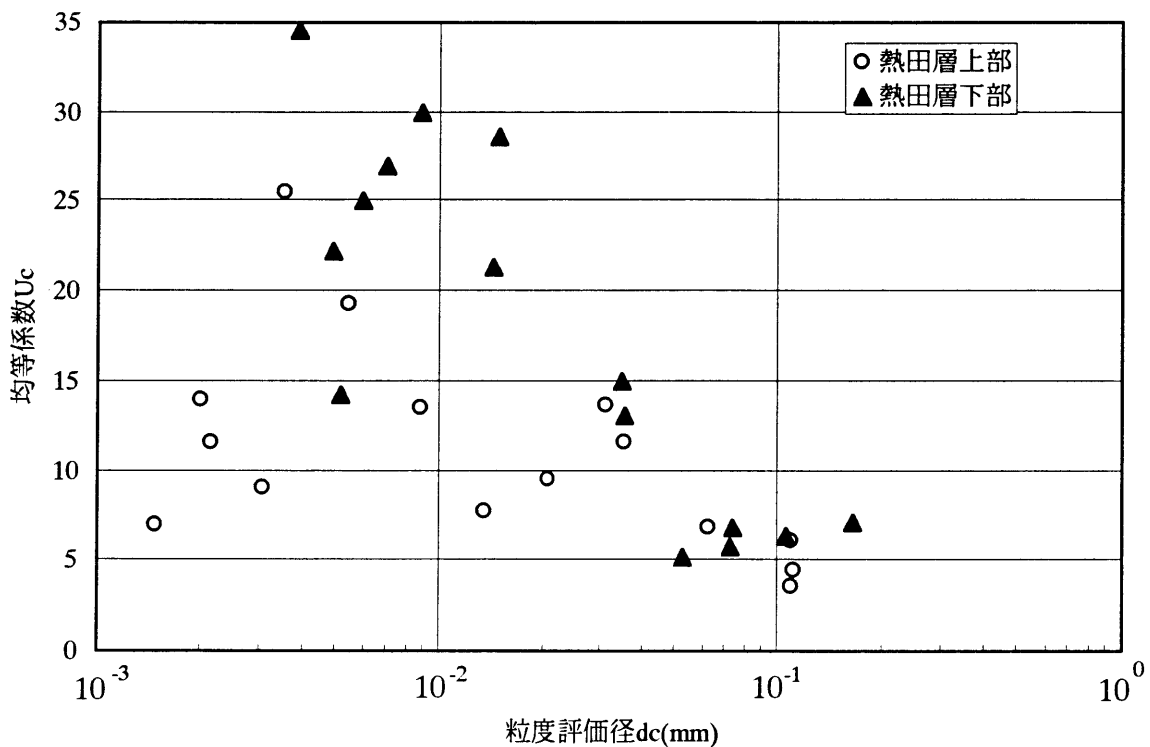


図-5.5.25 熱田砂層の粒度評価径

この図を図-3.5.1の施工選定チャートと比較すると熱田砂層の特徴として、以下の項目が抽出される。

- (1) 熱田砂層の上、下部砂層とも粒度評価径 d_c は $10^{-3} \sim 10^{-1}$ (mm)に分布しているが、熱田層下部がやや粗粒側である。
- (2) 約50%程度は特に液状化しやすいゾーンにある。

- (3) 細粒分が多く、透水係数が比較的小さいのでウエルポイントに適する。
- (4) 樹脂、尿素系の薬液注入の場合浸透注入が期待されるが、ケイ酸系は割列注入となり隆起が予想される。
- (5) 泥水加圧あるいは泥土圧シールドのゾーンにある。

等があげられる。これらの関係を総合すると、レキ層を除く熱田砂層はまさ土、シラス、標準砂等と同程度の粒度評価径 d_c になり水に弱い地盤と考えられる。

図-5.5.26は熱田砂層のN値の分布及びN値から推定した内部摩擦角 ϕ' を示した。図(a), (c)は熱田層砂のN値の分布, (b), (d)はN値から推定した内部摩擦角 ϕ' と粒度評価径 d_c によって推定した値を重ねてある。なお、後者では比重 $G_s=2.65$, 熱田層上部砂の間隙比 e を $e=0.8$, 熱田層下部砂の間隙比 e を $e=0.6$ と仮定して計算した。これらの図から、以下の特徴がみられる。

- (1) 熱田砂層のN値は上部砂層が10~20, 下部砂層が20~30をピークとする分布を示す。
- (2) 上部砂層の内部摩擦角 ϕ' は大崎の式 ($\phi' = \sqrt{20 \times N} + 15$) から推定した内部摩擦角 ϕ' と、粒度評価径 d_c から推定した内部摩擦角 ϕ' は類似した分布を示す。
- (3) 下部砂層の内部摩擦角 ϕ' もN値から推定した値と、粒度評価径 d_c から求めた値の分布は類似している。しかし、N値から推定した内部摩擦角 ϕ' では40~50°付近にもピークがみられるが、これは礫等の局所的な狭在が予想される。

表-5.5.1 熱田砂層の試験材料⁵⁴⁾と推定内部摩擦角

d_{60} (mm)	d_{50} (mm)	d_{10} (mm)	d_c (mm)	h(mm)	$\tan(\phi')$	ϕ'
0.49564	0.43592	0.19002	0.08827	0.03755	0.78166	38.0327
0.53994	0.47488	0.23739	0.10102	0.04297	0.79533	38.5158
0.55398	0.48308	0.21792	0.09875	0.04201	0.78958	38.3135

板橋・植下⁵⁴⁾は熱田砂層の工事現場から乱さない砂のサンプリングを行い、三軸圧縮せん断試験を行っている。試験は乱さない試料と再充填試料が用いられ、各々の実験結果が下のように入えられている。

乱さない試料 37.9° , 37.2°

再充填試料 38.5° , 38.8°

これらの試料の粒度分布を文献から読みとったのが表-5.5.1である。これらの代表値を用いて、比重 $G_s=2.68$ 、試験間隙比 $e=1.14$ として、粒度評価径 d_c から推定した内部摩擦角 ϕ' は38.0~38.5°であり、熱田層砂の実験結果と類似した値が得られる。従ってこれらの結果より、熱田層砂におけるN値の分布特性は粒度特性を強く反映していることが予想される。

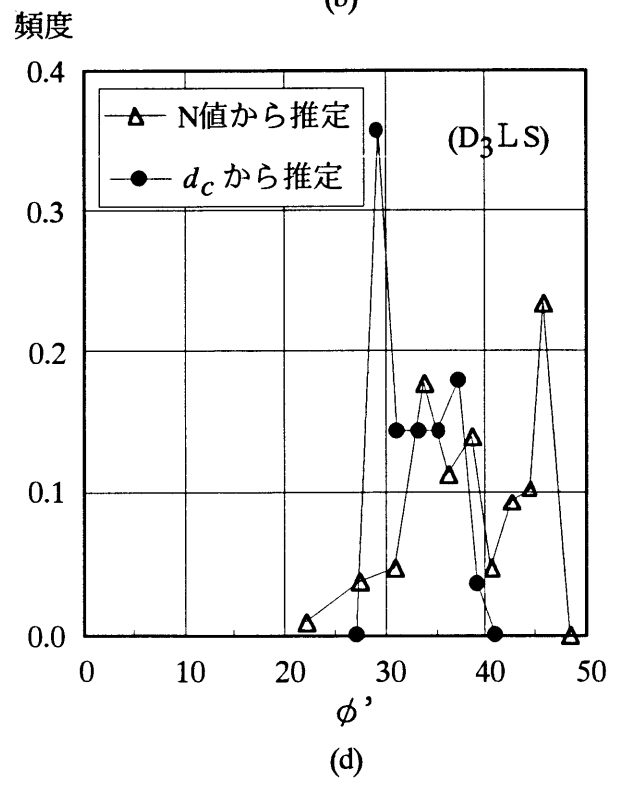
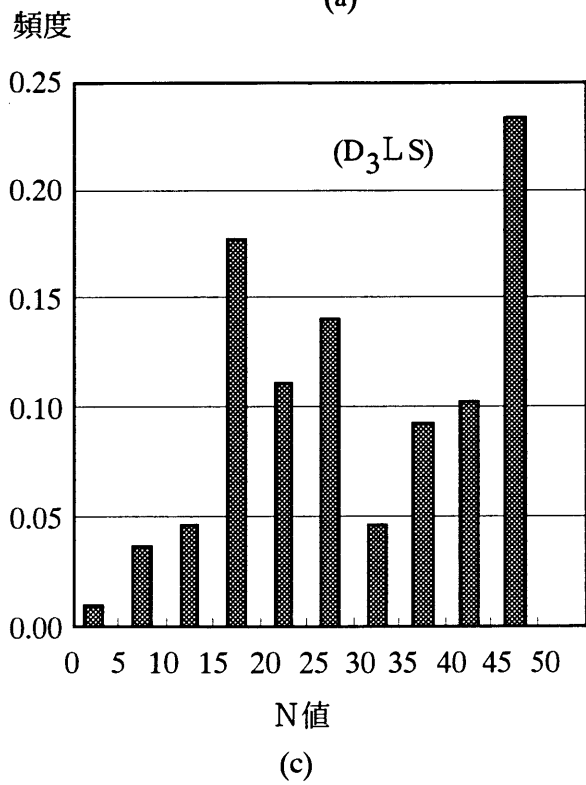
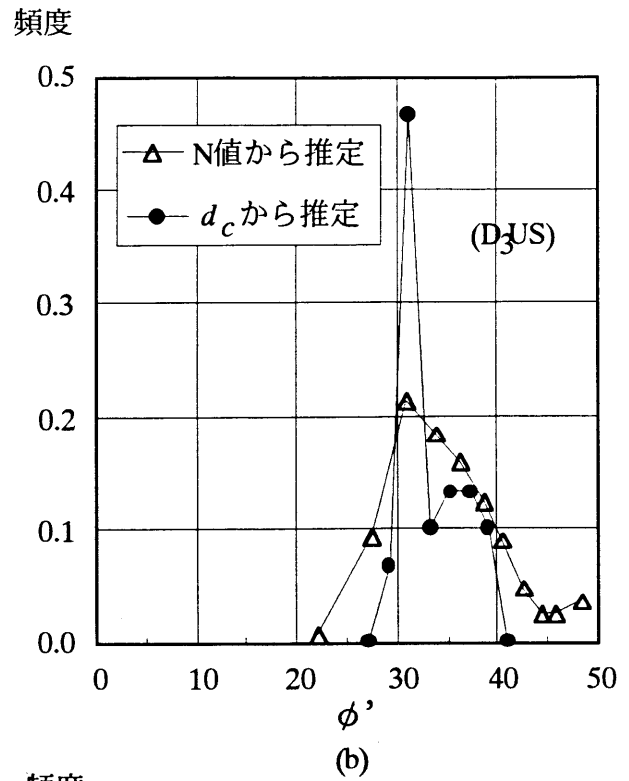
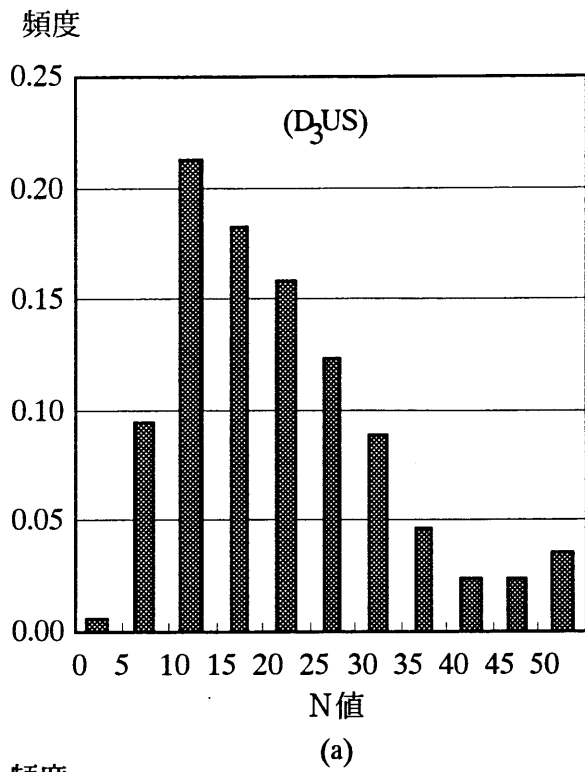


図-5.5.26 熱田砂層のN値と推定 ϕ' の分布

5.6 CBR特性の力学的評価方法

粒度評価径 d_c と間隙比 e , 比重 G_s が既知になれば粒度評価径 d_c から内部摩擦角 ϕ' が推定できる。CBR値は基準となる貫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ーになっている。これらの諸条件を考慮して, 3章で示した粒度評価径 d_c を用いて力学的に評価してみた。

図-5.6.1は図と同じデータを用いCBR試料の粒度分布から粒度評価径 d_c より推定した内部摩擦角 ϕ' とCBRの関係を示した。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。この力学的条件は砂を対象にして, 粘着力を0と考えると, 極限支持力, 支持力係数は式(5.6.1), (5.6.2)で示されると仮定する。

$$q_f = q_o \cdot N_q \quad (5.6.1)$$

$$N_q = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \cdot \exp(\pi \tan \phi') \quad (5.6.2)$$

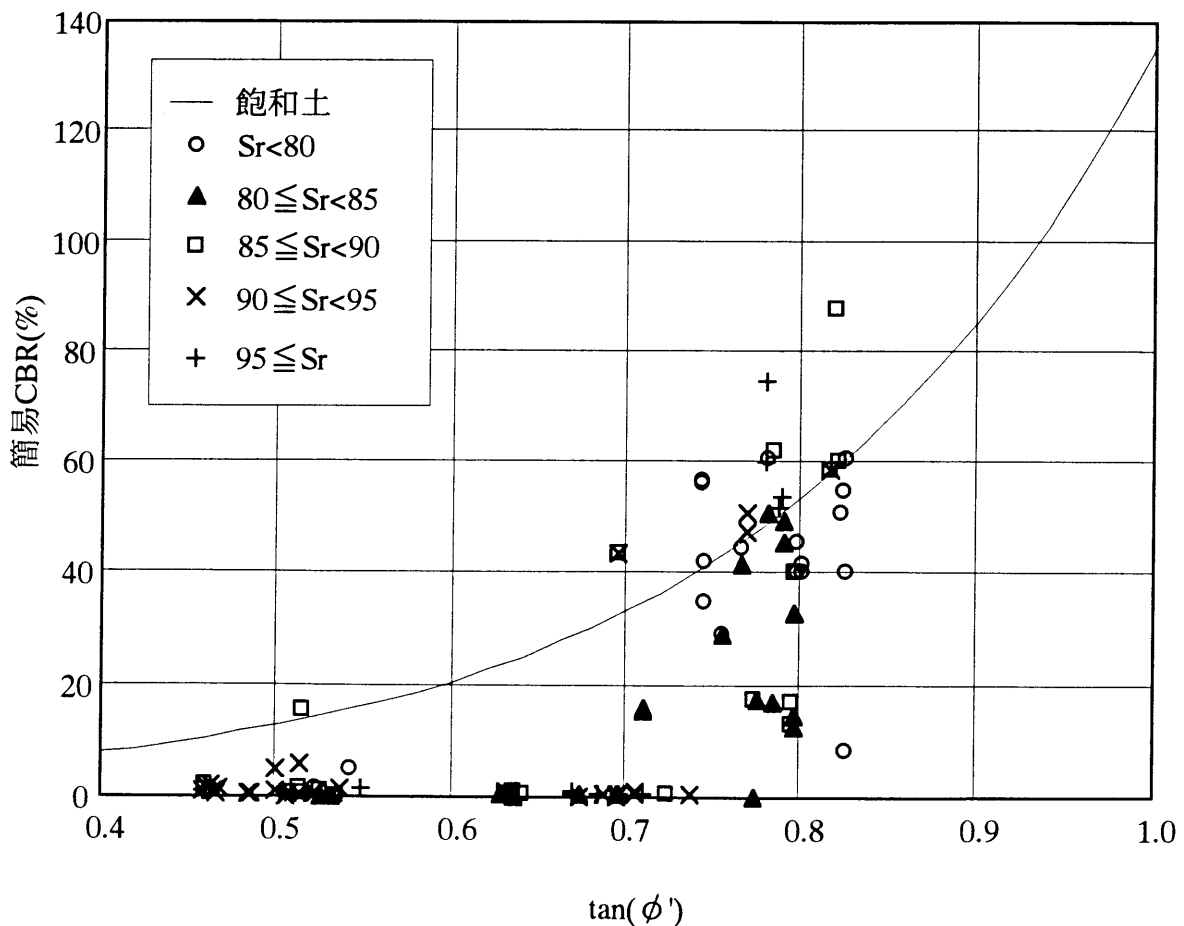


図-5.6.1 内部摩擦角とCBR

ここに q_f : 極限支持力, q_0 : 押さえ分布荷重強度, N_q : 支持力係数である。図-5.6.1の実線は $q_0=1$ として上式より得られる極限支持力を示している。CBRの平均的な傾向は特に $\tan \phi' > 0.8$ の範囲では上式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。

5.7 むすび

本章では幅広い多様な分野を対象にして粒度評価径法による土質分類の可能性と有効性を検討した結果を示した。以下に本章の結論を示す。

(1) 諸戸らの強度推定式と提案式の比較

提案した強度推定式は諸戸らのラウンドネス0.6~0.8付近の傾向に類似している。また諸戸らの推定式は均等係数が10程度までの範囲に適用されるが、均等係数が10以上になる粒度特性の土の強度は諸戸らの強度式とは異なった傾向が予想される。

また提案式の一般化を図るためには形状特性の研究が必要であることを指摘した。

(2) 粒度評価径法による不均質地盤の表現方法の提案

土質の不均質性を表現するため、N値や間隙比等が深度方向に示されるが、粒度評価径も深度方向分布で示すと有効な情報を与えることを示した。特に粒度評価径法は粘性土の透水係数の推定にも使用できることを考慮して、土質を問わず粒度から推定した透水係数と圧密試験結果や現場透水試験結果を重ね書きすれば複雑な地層の水理条件が描けることを示した。また大阪層群の礫質土は粒度評価径の分布から、粘性土的な層が狭在していることを示した。また粒度評価径とN値の関係を示し、N値には粒度特性が反映されていることを明かにした。

(3) 液状化判定と粒度評価径法

粒度分布による従来液状化判定法の問題点をまさ土の液状化を対象に整理し、粒度評価径法による方法を提案した。粒度評価径法では粒度分布曲線を描く必要はなく、N値のように深度方向に表現できるので、液状化の第1次判定段階では有効になる。

また種々の文献から液状化強度を集積し、透水係数と内部摩擦角 ϕ' からなる図を提案し、まさ土の強度を推定した。

(4) 堆積条件と粒度評価径法

堆積条件の同定では、堆積環境が粒度特性に反映されるような条件では粒度評価径でも分類できる可能性があることを示した。

高塑性の大阪の粘性土と低塑性の釜山の粘土の比較研究における粒度評価径の役割では、釜山の粘性土は大阪の粘土に比べ中間土的な特性を有していることを示し、この傾向は粒度評価径によって区分できることを示した。また圧密透水係数も粒度評価径法によって推定できることを示し、両地域の差異も説明できた。

大礫を含む礫質土の土量変化率と強度の評価は、例え試験ができたとしてもその精度が問題である。このため少ない試験データを活かすためには既存資料と比べることが必要であり、この基準に粒度評価径法が有効に適用されることを示した。特に

最大・最小間隙比状態における平均間隙径深の特性は均等係数が大きなところでも概略的な適用が可能であり、道路土工指針の土量変化率とも関係することを示した。

名古屋熱田砂の力学特性はN値から推定した内部摩擦角 ϕ' と粒度評価径法による推定値の分布特性が類似していること、文献による実験結果も推定値に近似していることから、粒度評価法により熱田砂の力学特性が推定できること、またN値には粒度分布が反映されていることを示した。

(5) CBR特性と粒度評価径法

CBRについては3章で詳細な分析をしているが、定性的な分類の域に留まっていた。このため、本節では端緒的ではあるが、 $\tan(\phi') > 0.8$ であればCBR値は直接基礎の強度式から推定できることを示した。しかし $\tan(\phi') < 0.8$ のゾーンではCBR値には飽和度の影響が強く現われ、推定式から急激にずれていく特徴が見られる。これは今後の研究課題である。

参考文献

- 1) 福田光治，諏訪靖二，小西憲一，井上隆夫，中島伸一：大阪湾岸埋立材料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第III集，pp.110-111，1994.
- 2) 李弘揆：礫質土の締固め特性とその強度に関する研究，名古屋大学博士学位申請論文，pp.141～143，1995.
- 3) 諸戸靖史：粒状体の変形と強度に関する基礎的研究，東北大学博士学位申請論文，pp.72-83，1976.
- 4) 下辺悟，諸戸靖史：粗粒土の粒子物性，締め具合と内部摩擦角，土木学会第45回年次学術講演会概要集，第III集，pp.728～729，1990.
- 5) 下辺悟，諸戸靖史： $\bar{k}-e_{\min}$ 図による粗粒土の工学的分類，土質工学会「土の判別と工学的分類に関するシンポジウム」発表論文集，pp.49～54，1994.
- 6) 最上武雄：粒状体の力学，土木学会監修・最上武雄編「土質力学」，技報堂，p.1029，1969.
- 7) 宮森建樹：最大密度試験法による粒状体の締固め特性について－特に粒度との関連において－，土質工学会「砂の相対密度と工学的性質に関するシンポジウム」発表論文集，pp.39～40，1980.
- 8) Powers, M.C. : A new roundness scale for sedimentary particles, Journal of Sedimentary Petrology, Vol.23, No.2, pp.117～119, 1953.
- 9) 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），p.204，1989.
- 10) 日本道路協会：道路橋仕方書・同解説，V 耐震設計編，pp.38-45，1992.

- 11) 宮森建樹：粒度分布が砂の最大最小密度および最小密度に及ぼす影響について，土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集，pp.141～144，1978.
- 12) 藤本廣，横田漠：乱したシラスの動的変形特性（第1報），土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集，pp.277～280，1975.
- 13) 石原研而，山田恭史，北川久雄：三主応力を変化させた砂のせん断特性，土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集，pp.161～164，1973.
- 14) 今井五郎，川原靖雄：砂の圧縮特性と液状化強度の関係，土質工学会第10回土質工学研究発表会講演概要集，pp.333～336，1975.
- 15) 小田匡寛：砂質地盤の異方性について，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.121～124，1976.
- 16) 八木則男，西田義親，矢内久孝：砂の一次元圧縮について，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.187～190，1976.
- 17) 山内豊聡，松田滋，一瀬久光：繰返しネジリ三軸試験によるシラスの液状化について，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.327～330，1976.
- 18) 岩崎敏男，龍岡文夫，吉田精一：砂の動的変形特性に及ぼす粒度分布の影響，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.343～346，1976.
- 19) 畑中宗憲，大岡弘：凍結法による飽和資料採取の際の凍結の影響について，土質工学会第11回土質工学研究発表会講演概要集，pp.897～900，1976.
- 20) 岩沢正俊：細粒分を含んだ不攪乱資料の液状化試験，土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集，pp.397～400，1977.
- 21) 原田次夫，打田靖夫，大長昭雄：大型単純せん断型液状化試験機の開発と液状化実験例，土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集，pp.401～404，1977.
- 22) 沢田健吉，古賀泰之，間三男：砂質土の繰返しせん断特性に及ぼす初期せん断，土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集，pp.425～428，1977.
- 23) 川辺一洋，青木雄二郎，柴崎富士夫：砂質土における模型杭の引抜き性状に関する実験，土質工学会第12回土質工学研究発表会講演概要集，pp.725～728，1977.
- 24) 荻野弘雅，今井五郎，篠崎博：飽和砂の液状化に及ぼす平均粒径・均等係数の影響，土質工学会第9回土質工学研究発表会講演概要集，pp.371～374，1974.
- 25) 矢野弘一郎，今井五郎，川原靖惟：三軸試験における砂の接線弾性係数，土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集，pp.417～420，1978.
- 26) 徳江俊秀，北原義信：上下振動下での乾燥砂礫材の動的破壊・変形特性，土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集，pp.493～496，1978.
- 27) 塩見哲，成瀬恵一：破壊近くの砂の動的特性，土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集，pp.505～508，1978.
- 28) 大原資生，山本哲郎：砂質土の液化に関する2，3の考察，土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集，pp.525～528，1978.

- 29) 梅原靖文, 善功企, 浜田浩二: 飽和砂の液状化強さと静的性質の相関性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.529~532, 1978.
- 30) 社本康弘, 吉見吉昭, 石井雄輔: 繰返しセン断履歴をうけた飽和砂の液状化抵抗, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.533~536, 1978.
- 31) 沢田健吾, 古賀泰之, 館山悟: 河床砂レキの液状化特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.537~540, 1978.
- 32) 草野郁, 小川好: 細粒分を含む沖積砂の液状化特性一過圧密くり返しセン断履歴が液状化強さに及ぼす影響, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.541~544, 1978.
- 33) 林七郎, 小川保, 米田治, 安田進: 締固めたマサ土の液状化特性, 土質工学会第13回土質工学研究発表会講演概要集, pp.597~600, 1978.
- 34) 土壌物理研究会編: 土の物理学, 森北出版, pp.29-30, 1979.
- 35) 土質工学会関西支部大阪湾海底地盤研究委員会 (1992): 大阪湾海底地盤, pp.85-88, 1992.
- 36) 濱田晃之, 諏訪靖二, 福田光治: 埋立地における土質工学的特性の整理方法, 土質工学会第29回土質工学会研究発表会講演概要集, pp.253-254, 1994.
- 37) 諏訪靖二, 福田光治, 濱田晃之, 鄭京皖 (1994): 大阪湾岸と釜山の土質特性の比較, 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第III集, pp.84-85, 1994.
- 38) S.Z.Park: Soil Properties of Coastal Area in Korea and a Summary of Man-Made Island in Pusan, International Exchange Committee of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kansai Branch 「Soft Seabed Deposit」 KIGForum '90, pp.45-52, 1990.
- 39) 朴永穆, 三浦哲彦, 金浩一, 呉多泳: 京畿平野の土質特性とその地盤改良に関する考察, Reports of the Faculty of Science and Engineering Saga University, Vol.21, pp.77-88, 1992.
- 40) 土質工学会: ジオテクノート②中間土砂か粘土か, P.85, 1993.
- 41) 中瀬明男, 中ノ堂祐文, 日下部治, 野村浩: 混合土の圧密特性について, 土質工学会第13回土質工学会研究発表会講演概要集, PP.213-216, 1978.
- 42) 倉田進, 藤下利彦: 砂と粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸省港湾技術研究所報告, Vol.11, No.9, pp.389-424, 1961.
- 43) A.W.Skempton: The colloidal activity of clay, Proc. 3rd I. C. S. M. F. E., Vol.1, pp.57-61, 1953.
- 44) 土質工学会編: 第2章土の基礎・物理化学的性質, 土質工学ハンドブック, p.42, 1982.
- 45) 橋本正, 坂元稔, 大西翼美, 小西謙一: 粗粒材料の現場密度試験方法の一提案, 土質工学会第22回土質工学研究発表会講演概要集, pp.149-150, 1987.
- 46) 日本道路協会: 道路土工施工指針, p.33, 1985.
- 47) 岩崎好規: コウ積層の動的性質, 土質工学会「大阪地盤一特に洪積層の研究と

図より $\bar{k} \sim e_{min}$ チャート上では推定式は平行であり，50%粒径が大きくなると上方(k が大きくなる方向)に平行移動していくことがわかる。下辺・諸戸が提案する関係式はラウンドネス R により平行移動することを示している。しかし，図-5.2.4では粒度の大きさによっても変化することが予想される傾向を示している。

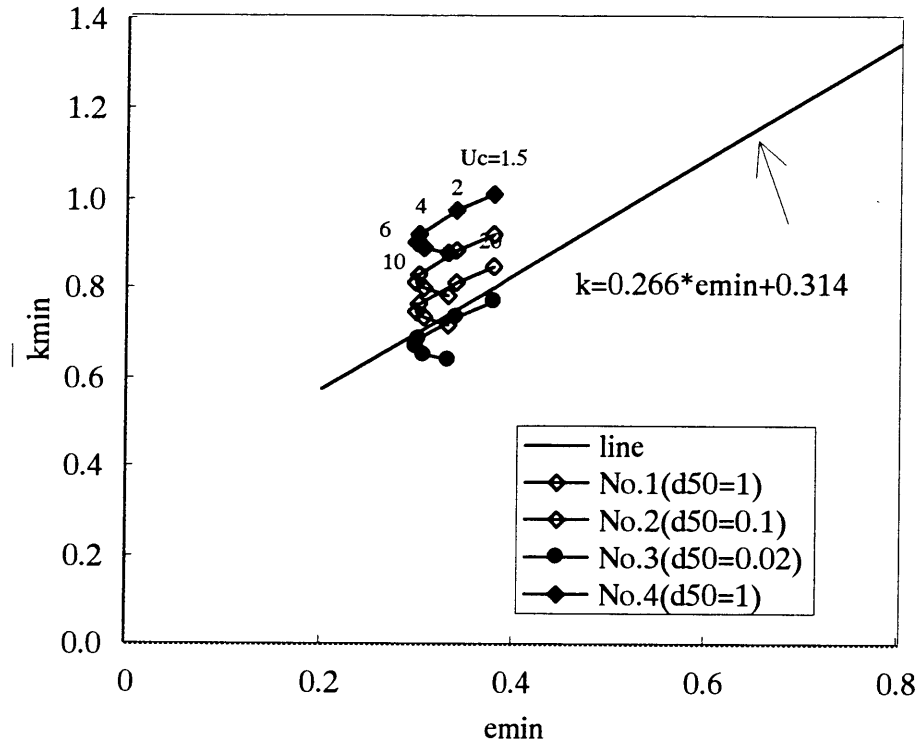


図-5.2.4 粒径を変えた時の推定式

第6章 結論

本研究は日本統一土質分類法に代表される命名法による土の分類法の構造的課題点を明らかにし、それに替わる分類手法として連続的な一個の数値で表される粒度評価径法を提案し、その適用効果や精度を調べたものである。粒度評価径法は土の粒度分布から単純に計算される指標を基礎としているが、間隙比や含水比が与えられると平均間隙径深 h や平均水膜厚 b が推定でき、これらの間隙径モデルを背景に、透水係数や内部摩擦角 ϕ' あるいは概略的な最大・最小間隙比を推定することができる。

本論文ではこうした間隙径モデルと力学的諸関係を基礎にした分類法を粒度評価径法と呼び、間隙径モデルの展開方法、実験結果による力学的諸関係式の誘導、粒度評価径法による日本統一分類法の構造特性の分析、中間土や粘性土の粒度評価径による分析及び幾つかの実務的な問題への適用結果と粒度評価径法の役割等をまとめた。

以下にこれらの研究成果を要約して結論とする。

まず第1章では土の分類法の意義、特徴等を分析し、土質分類のあるべき役割を検討した。様々な形状や粒径の土粒子と液相、気相からなる分散系としての土を、砂や粘土のように2極化するのではなく、土全体を対象に把握しようとする場合は、命名法を基礎にした分類法では困難であることを概念的に示した。生物学の言葉を借りて土の挙動は連続的であり、命名法に要求される同一性と差異性のカテゴリーを含むことはできないこと、またTerzaghiの言葉を借りて数値としての分類法の開発が必要であることを示した。

第2章では粒度評価径法の基礎的概念を展開した。土の力学的な挙動を支配する土粒子の骨格や間隙は質量基準の粒度分布よりも、個数基準の粒度分布が強く関係することを示し、粒度分布に対数正規分布性を仮定することによって、土質分野で一般的に実施されている質量基準粒度分布から個数基準粒度分布の代表値を導く方法を示した。そして個数基準粒度分布の代表値を根拠にして、土の間隙の大きさに対応する平均間隙径深 h と平均水膜厚 b の誘導式を提案し、実験結果によってその物理的意義を確認した。また、これらの概念を基に、古くから土質分野で使用されている有効径が個数基準粒度分布の平均径ではなく、平均間隙径深 h に対応していることを明らかにすることができた。

本研究における第2章の内容として技術者や研究者に有効となる分類法としての基礎的な課題を整理しておく役割を与えた。このため上記に示したように物理的に確認された間隙径モデルを基礎に透水係数、内部摩擦角 ϕ' 、最大・最小間隙比における間隙状態の研究を行ない、実験結果に基づいた関係式を示した。透水係数と平均間隙径深 h の関係では、実験から求めた関係式の構造から類推して平均水膜厚 b が透水係数に関係していることを示し、不飽和透水係数もある程度この考えで説明できることを明らかにした。内部摩擦角 ϕ' は間隙径深 h 自体ではなく、粒子同志の接

触度合いを念頭に置いて、粒径と間隙径の関数を仮定した。この結果実験結果によって±4°の精度におさまる関係式を示した。最大・最小間隙比も平均間隙径深 h よりも間隙径を粒径で正規化した関数と関係することを明らかにし、関係式を導いた。そしてこの研究結果として均等係数が5～7付近に最小間隙比を最小とする粒度分布が存在することを指摘した。

第3章は第2章で提案した平均間隙径深 h と平均水膜厚 b 等の間隙モデルが透水係数、内部摩擦角 ϕ' 、最大・最小間隙比等と強い関係にあることを明らかにしたことをうけて、平均間隙径深 h と平均水膜厚 b の関数上の特徴を考慮して分類手法になる基礎的項目の研究結果を示した。平均間隙径深 h と平均水膜厚 b は粒度分布から直接誘導される部分と2次素因である間隙比の積になっていることを明らかにし、前者を粒度評価径と定義した。

本章ではこの粒度評価径を用いてCBRの分布特性、透水係数、内部摩擦角 ϕ' と命名法の関係を介して、日本統一土質分類法の構造的特性の分析を行い、粒度評価径が分類法の基礎となり得るか、また日本統一土質分類法に含まれる歴史的に蓄積された知識を反映することができるかを中心に示した。この結果連続量としての粒度評価径は命名法に集積された情報を含んでいることを明らかにし、命名法の力学的特性は同じ分類を与えられたとしても、分類内の土質特性は分散していること、従って連続量である粒度評価径法が有効であることを明らかにした。粒度評価径法の分類手法としての有効性を示すために基礎的な応用課題として粒度調整法と施工法における選定基準における粒度評価径の関係を明らかにした。粒度調整法は主としてダムや盛土工事では材料の混合と密度調整に使用されているが、基本的な考えは室内試験における大礫を含む粗粒土の試験でも試験粒度と原粒度の関係として常に問題になる。これを試料の粒度分布の変化と試験結果に関する問題として把握し、粒度評価法を適用することができることを示した。また各分野で個別的に提示されている施工法の選定基準を粒度評価径で整理したチャートを示し、各分野ではばらばらに示されていた選定基準がこの図によって統一的な土質特性のイメージを作ることができることを明らかにした。

第4章は粒度評価径法を粘土を含む細粒土に拡張した研究成果である。

まず粘土と砂の中間的な意義づけが行なわれている中間土の分類方法を取りあげた。特に細粒分含有率と粒度組成区分点の選定問題を対象にした。この問題は粒度評価径と細粒分含有率の関係から整理することができることを明らかにし、その結果として粒度評価径から分析した粒度組成区分点を示した。これらの区分点は日本統一土質分類法とは若干異なり、イギリスの方法に近い結果となった。さらに粘性土の圧密透水係数を対象に粒度評価径法の適用精度を研究した。この結果、正規圧密部分の透水係数は圧密試験で得られる圧密透水係数と推定値は全体に1～2オーダーになること、特に粒度分布が滑らかであれば1オーダー以内の精度で推定できることを示した。しかし階段状の粒度分布を示す場合は推定精度が劣ることが明かになった。また過圧密部分の透水係数は圧密理論として再評価すべきことを指摘した。

以上の研究成果によって粒度評価径法は粗粒土ばかりでなく中間土や粘性土にも適用できることを明らかにした。

連続量としての数値を用いた分類方法に群指数がある。群指数の定義から推定すると、この分類法は粘性土を分類する指標と考えられる。そこで細粒土部分の分類を対象に粒度評価径法と群指数の関係を研究した。この結果ばらつきはあるが粒度評価径と群指数は平均的には指数関数的な関係になることを明らかにした。そして群指数では粗粒土を分類することは困難であるのに対し、粒度評価径は粗粒土を分類できるため、粒度評価径法は群指数の特性も含む幅広い適用性があることを明らかにした。

第5章は粒度評価法の適用範囲や適用精度を調べたもので、下記の項目をとりあげた。

- 1) 諸戸らの強度推定式と提案式の比較
- 2) 不均一性地盤の粒度評価径法による表現方法
- 3) 粒度評価径法による液状化可能性の評価方法
- 4) 堆積条件の評価における粒度評価径法の役割
- 5) CBR特性と粒度評価法の関係

1) では間隙径モデルにおける最小間隙比特性をとりいれて諸戸らの強度の推定式と提案式の類似性を示した。この二つの強度推定式の比較結果から提案式はラウンドネスが0.6~0.8と類似した傾向を示す。従って幅広い土を対象にする場合は本論文で提案した強度式は形状効果を取り入れる必要があることがわかった。反対に均等係数が大きくなれば諸戸らの提案式とを異なった傾向がみられることが予想されることを示した。

2) では粒度評価径法で推定した透水係数を深度方向に選べることによって地盤の不均質性が表現できることを示した。特に粘性土の圧密透水係数が粒度評価法で推定できることが実証されたので、透水係数に関しては圧密透水係数、現場透水係数を、粒度からの推定値と一緒に示すと複雑な水理条件が表現できる。

また標準貫入試験のN値と粒度評価径法の関係も示した。この課題ではN値から推定した内部摩擦角 ϕ' の分布と粒度評価径法から推定した値の分布はよい関係があることを示し、N値には粒度特性が強く反映されていることを明らかにした。このため、不均一地盤の表現方法として粒度評価径法が有効であることを明かにした。

3) では粒度分布のゾーンによる液状化評価方法の限界を指摘し、粒度評価径法による方法を示した。また内部摩擦角 ϕ' と透水係数からなるチャートを提案し、ひずみ5%、繰り返し回数20回の液状化強度を整理した。従って、粒度評価径がわかれば、この図によって概略的な液状化強度が推定できることを示した。

4) では高塑性の大阪湾粘性土と低塑性の韓国釜山の粘性土特性の同定に粒度評価径法を適用した。この結果コンシステンシー特性や圧密透水係数特性は粒度評価径法の適用が可能であり釜山の粘性土は中間土的であるが、粒度評価径法によって、

両地方の粘性土を統一的に評価できることを明らかにした。

5) では堆積条件が粒度評価径法でも区分可能になること、熱田砂層のN値から推定される内部摩擦角 ϕ' の分布と粒度評価径法による推定値のばらつきの傾向が類似していることを示した。

大礫を含む礫質土の試験は通常の試験条件を越えており、尖頭粒度や相似粒度に粒度調整された試料を用いて試験を行ない、これらの結果から原粒度の礫質土の力学的特性を推定することが多い。しかし礫質土の試験は例え粒度調整された試料を使用したとしても、大型試験になれば、その精度が問題になる。しかも一般的に試験数も少ないので試験結果の評価基準が必要になる。本論文では土量変化率と内部摩擦角 ϕ' をとりあげて、この評価基準に粒度評価径法が有効に適用でき、原粒度の土の予測は粒度評価径に対応させた外捜が有効であることを示した。

6) CBR値のばらつきは $\tan \phi' > 0.8$ であれば直接基礎公式を用いて推定できることを示した。しかし細粒分が増加し、内部摩擦角 ϕ' が小さくなれば、飽和度の影響が大きくなり、予測値に対して急速にCBR値は小さくなる傾向にあることを明らかにした。

本研究は土質分野の力学的挙動を横断的に把握できる土質分類法の開発を目的とした。このために日本統一土質分類法等の命名法による分類ではなく、連続量である粒度評価径法なる指標を提案し、基礎的研究、応用的研究を行なった。そして応用的課題における土質力学の近似的な挙動が粒度評価径法で推定できることを示した。しかし土質分類は性格上巾広い土質特性を対象にする必要があり、締め固め土の密度や透水係数、内部摩擦角 ϕ' 等の変化特性、粘性土の過圧密部分の透水係数の評価、階段状の粒度分布と力学特性の関係、形状効果の評価等残された課題は多く、本論文で示した範囲で示される粒度評価径法は適用が困難な分野も存在することがわかった。土質試験を行わず粒度評価法だけで土質定数を決定する方法は研究対象外であるが、粒度評価径法の基礎となった間隙径モデルをもとに課題となった問題と取り組み、土質分類法の精緻化をめざす必要がある。

謝辞

本研究は業務を通じて育ててきた土質構造の基礎的概念とそれを土質分類方法として発展させ、まとめたものであります。

社会人技術者として初めて取組んだ分野は小さなため池の堤体材料調査と道路舗装用調査で、粘性土から砂質土まで幅広い土質を対象にしなければなりません。また、配属された土質部門は設立されて間がなかったため、力学実験等は大学の施設を借りて実施していました。このため実験データの精度評価は最大の関心事になり、一般的な研究成果や実績に対して何を基準として判断するかを、常に考えて臨まなければなりません。充実した試験室に変わっても同じような問題意識は必要であり、実験で得られたデータであっても、種々のばらつきが含まれていることがわかってきました。その判断基準は、多くの研究者・実務者が提出する平均的な特性から離れていないことがひとつの指標になるという考えに到りました。しかし、既存の土質分類をこの指標とするためには種々の問題点が含まれており、また、その他の指標も土質の各分野で、異った意義をもっていることもわかってきました。こうした初心者の経験を踏まえて、土質分野で統一したイメージと定量的な意義をもつ土質分類方法を考えて見たいという問題意識が育ち、業務の合間をぬって、基礎的考え方を研究してまいりました。そして社会人博士課程入学はまさにこの問題に真剣に取り組む契機になり、多くの研究課題が残されていますが、論文として整理することができました。

岐阜大学教授宇野尚雄博士には本研究の機会を与えて頂き、また研究の全過程わたくし懇切丁寧な御指導とご鞭撻を頂きました。忙しい業務と並行した研究生生活で、データの整理、論文の推敲、研究の方向性の模索等数多くの問題に直面することに成りましたが、先生の温かいご助言と、研究者としても真摯な姿勢はややもすれば困難な壁の前で留まろうとする気持を克服する支えになりました。学生時代には思いもしなかった研究生生活を送ることができたことは今後の人生の大きな励みになると信じています。深堪なる敬意と感謝の意を表します。

財団法人大阪土質試験所赤井浩一理事長、岩崎好規所長、橋本正所長代理、諏訪靖二副所長、本郷隆夫副所長をはじめとする職員の皆様には、研究過程で生じた土質構造等に関する課題、土質試験データの評価方法等に関して討議を行って頂き有益な示唆を得ることができました。また日常業務への支障も厭わず社会人博士課程への入学をご許可頂き、3年間の研究生生活を温かく見守って頂いたことは技術者としての自覚を深める契機にすることができました。また私が所属している財団法人大阪土質試験所技術一部の同僚も仕事量を調整し、研究の遂行を援助して頂きました。特に女性職員には論文の入力作業という煩わしい仕事を手伝って頂きました。

この論文には韓国の友人との技術的交流によって刺激された研究成果も含まれています。特に粒度評価径法の適用範囲を大胆にも粘性土まで拡張する考えは彼らとの交流によって生まれたものです。国は異なっても技術者として困難な問題に真摯に

対処していく姿勢の共通意識と、互いに叱咤激励し合ってきたことは研究を継続する大きな支えに成りました。釜山大学校工科大学教授朴性栽博士，三星物産建設部門金大暎技術企画部長，東亜地質理事鄭京院博士をはじめとする韓国の友人に感謝の意を表します。

本論文には収録できませんでしたが，研究生活中何度かカンボジア国アンコール遺跡の地盤調査に参加し，日本では考えられない安定塊上の特異な土質特性の研究を行うことができました。また建築史や考古学の皆様とも土質構造や石質の風化等に関して親しく議論することができ，土質構造を基礎とする研究の重要性を認識させて頂きました。早稲田大学理工学部教授中川武博士をはじめとする日本国政府アンコール遺跡救済チームの団員の皆様に心から感謝致します。

本研究の大きなテーマには初心者・未経験者に有効な土質分類方法の提案であります。土質分類の研究は巾広い土質特性と工学的分野が対象になりますので，種々の文献に記載されたデータを頼りに一般性を確認することにしました。このため大阪土質試験所理事長赤井浩一博士（京都大学名誉教授）の博士論文，不動建設ジオ・エンジニアリング事業本部工務部企画室長坪井英夫博士の混合土に関する論文，中部大学工学部土木工学科教授植下協博士（名古屋大学名誉教授）の土質分類や熱田砂層の強度に関する論文等を代表として多くの文献からデータを引用させていただきました。一人一人名前をあげることはできませんが，心から感謝の意を表します。

最後に日常業務の中で研究生活を送るためには家庭生活を含めて厳格な集中心と創造力を研磨する必要がありました。このため家庭生活を犠牲にすることも厭わず研究と業務に3年間没頭することになりました。人生の大きな節目として論文作成に到達できたことは影の支えが励みになり，勇気づけてくれました。心から感謝の意を表します。