

堤体の浸食メカニズムに関わる 砂の間隙構造の評価

杉井俊夫, 川部らら*

Estimation of Pore Size Distribution of Sand Using Soil Water Characteristic Curve

Toshio Sugii and Lala Kawabe*

In the occurrence of river levee piping, the soil particle under seepage force will flow out through a larger pore size than it. Therefore, it is necessary to evaluate pore size distribution of river levee soils. The purpose of this research is to propose a method to estimate the pore size distribution of sand from information on physical properties. We developed a soil water retentivity test which can continuously obtain data and evaluate the pore size distribution from soil water characteristic curve. Moreover, the dynamic meaning of the obtained the pore size distribution is verified. In addition, we proposed a simple method to estimate pore size distribution from particle size distribution and pore information.

Keywords : *Piping, Pore size distribution, Soil water characteristic curve*

1. はじめに

昭和 51 年の長良川の破堤から 37 年, 平成 25 年の矢部川¹⁾や平成 27 年の鬼怒川の破堤²⁾をはじめ, 近年, 堤体基礎のパイピングが新たな「越水なき破堤」として再び見直されるようになった. 水中での土粒子は粒径の大きさや近接粒子との空間の大きさにより浮力以外にそれにみあう浸透力を受け, 浸透力の方が大きくなると間隙径と粒径の大きさの関係から土粒子流出が発生し, 浸食域が拡大し伸びていく. これがパイピング現象である.

パイピング現象である内部浸食は進行性の破壊でもあり, その単位が土粒子となることから, 連続体として取り扱われてきた地盤工学においては評価に限度があった. 地盤工学では, 砂質土が粒状体構造であるにも関わらず, これまで粒度分布や平均の空隙率に相当する間隙率としてしか評価してこなかった. 土質力学の教科書にもある土の締固め曲線と透水性, 強度定数の関係にある平均間隙率が同じでも, 2 つの透水性や強度定数が得られることは知られていてもそれを証明する土中の構造(間隙構造)を評価することができなかった³⁾.

地盤工学で間隙構造の評価が遅れてきた原因として次の点が挙げられる. 1 つ目は, 現場において

*学部学生(都市建設工学科)

は透水係数のようにマクロな空間での値として捉えることが優先されてきたこと、2 つには、間隙構造を計る技術が十分でなかったこと、にある。前者は、均質として取り扱うことを前提としており、トータルな平均的浸透挙動を扱うものなど、現場にあった方法である。しかし、より精度の高いまたは、説明できなかったメカニズムの解明には、近年の数値解析手法や局所的な問題や非均質な問題を考えていかなければならなくなっている。すなわち、マクロな空間値として評価する必要な場もあれば、メカニズム解明には非均質的なものを考えることが欠かせない。2 つ目については、工学で使用されてきた方法として水銀圧入法による細孔分布計測がある。しかし、土粒子の亀裂や凹凸といった細かな細孔径の計測であり、未固結の地盤材料においては力学特性との関係を示すには実用的ではなかった。また、本論文で使用する水分法である間隙径分布を水分特性曲線から求める方法は Donat によって発案された⁴⁾が、得られた水分法が示す間隙径分布がどのような意味を示すものであるか、明確ではなかった。さらには、不飽和土の重要な試験法である土の保水性試験が長時間掛かるわりに、離散的なデータしか得られないために、結果である間隙径分布の精度にも問題があった。

本研究は、連続的にデータを得ることができる土の保水性試験の開発とその結果である水分特性曲線を使って間隙径分布の評価を行うとともに、得られる間隙径分布の力学的意味を検証している。また、これまでの物理特性の情報から間隙径分布および水分特性曲線を推定する方法をも提案する。

2. Kenney-Lau の H-F Shape Curve と間隙くびれ径

Kenney ら^{5),6)}は、8 種類の孔を開けた板を用いての浸透及び振動試験より、粒状材料が形成する間隙の「くびれ径」を求め、ある粒径が形成する最小のくびれ径から内部安定指標を提案した。

Fig.1 に示すようにフィルター層を通過してくる粒子径を「間隙くびれ径」(Constriction size of filter) : D_c' とし、その最大の間隙くびれ径を「Controlling Constriction Size」: D_c^* と定義するとともに、浸透長さ L が D_c^* の 200 倍を超えると、 D_c^* は最小粒径の約 0.25 倍に等しくなることを得た。この D_c^* を用いることにより、**Fig.2(a)** に示すような粒度のフィルター材が内部侵食を起こさないためには、対象となる粒径 D の 4 倍粒径 $4D$ の粒子質量含有率 (H) が、粒径 D の質量通過百分率 (F) 以上存在する必要があることを示した。すなわち、「 $H/F \geq 1$ 」のときには安定、「 $H/F < 1$ 」のときは不安定、とフィルターの内部安定性を判断する指標を提案した。すべてのフィルターの粒子が安定であるには **Fig.2(b)** のようにある勾配以上の粒度分布であることが必要となる。なお、 $H+F \leq 1$ であるため、 F は最大 50% までを検討すればよいことを示した。

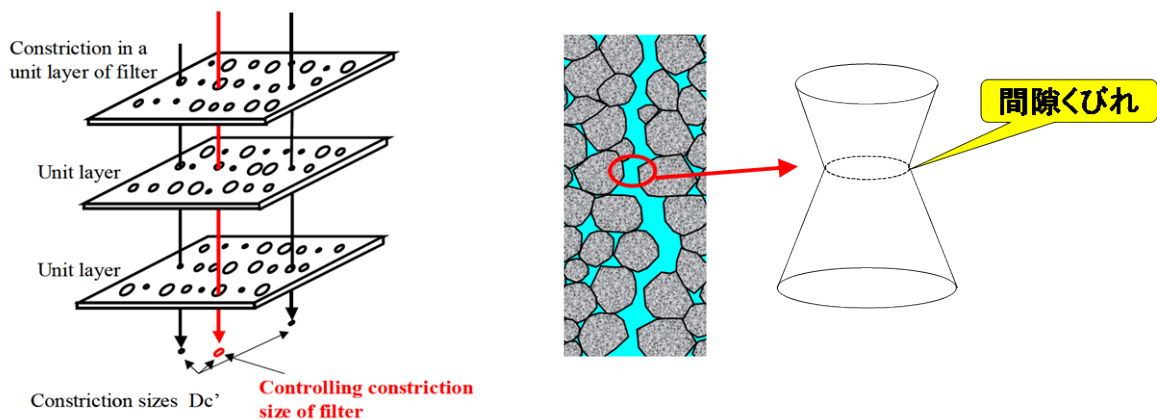


Fig.1 Kenney の間隙くびれ径 (Constriction size)

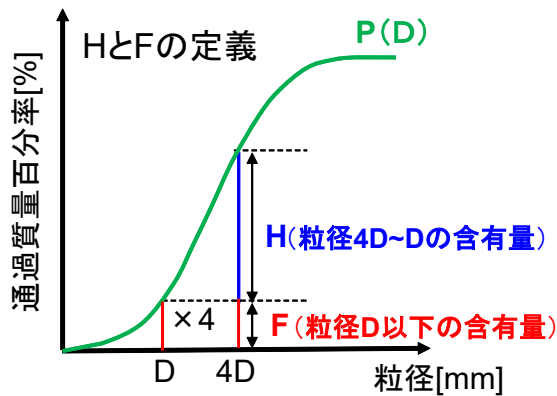


Fig.2.1 Kenney の H と F の定義

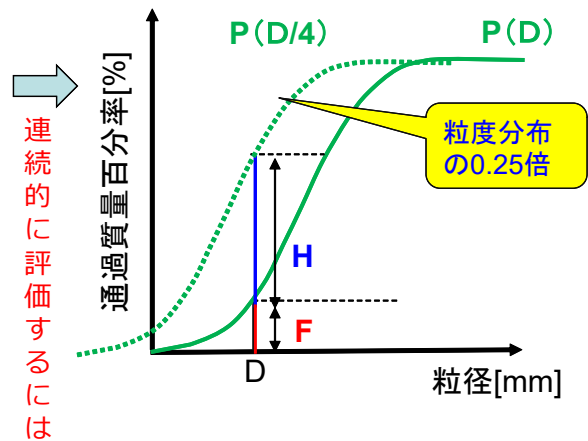


Fig.2.2 Kenney のフィルター内部安定指標 H/F

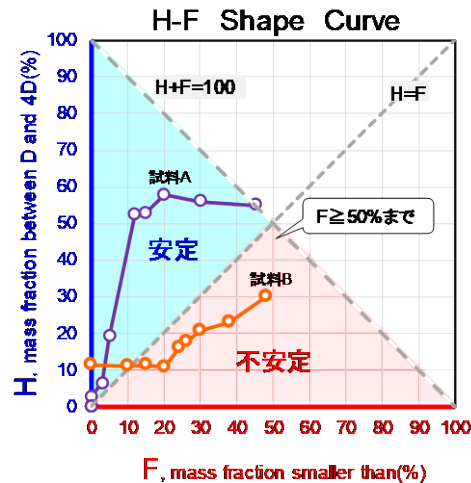


Fig.3 Kenney の H-F Shape Curve

3. 土の保水性試験による間隙径分の推定

3.1. 試験の概要

試験装置 ⁷⁾は Fig.4 に示すように 2 連式で、主に供試体を格納して加圧するチャンバーの他、電子天秤、コンプレサー、テンシオメータ、空気圧センサー、電磁弁、PLC（プログラムロジックコントローラー）、パソコンからなる加圧型装置である。供試体用モールドは、外部から体積変化も確認できるように内径 43.5 mm × 高さ 80 mm の透明アクリル製を使用し、供試体の高さ 50 mm を標準とする。供試体底部にはフィルター材として微細多孔質膜を使用、蒸発量の懸念からチャンバー全体の質量減少量から排水量を計測した。低サクション領域からの測定のために、大気圧下で重力排水から計測を始め、20 分おきに 5 から 10 cm 水頭程度 27 段階で加圧するように、PLC を使ってプログラミングし、データはロガーを通してパソコンにロギングしていった。今回用いた試料は、飽和透水係数が 10^{-5}m/s の豊浦砂であり、おおよそ 9 時間かけて段階的加圧を行った。

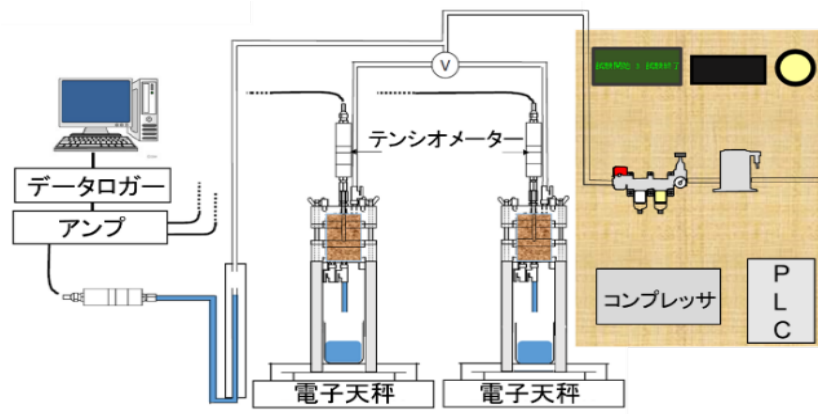


Fig.4 実験装置の概略図 7)

3.2. 試験材料と試験ケース

使用した試料は、均等粒径に近い豊浦砂を使用した。また、試料の締固め方を、水中落下法、突砂法、振動法の3つを用いて乾燥密度を変えて Table 1 に示す9ケースの試験を実施した。また、土の保水性試験に先立って、砂の最小密度・最大密度試験方法（JIS A 1224）に従い、豊浦砂の最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.847\text{Mg/m}^3$ を求めた。また、各 CASE の供試体の乾燥密度 ρ_d を最大乾燥密度 ρ_{dmax} で除した値を今回使用したケースを Table 1 に示す。なお、CASE の T は豊浦砂を、数字は乾燥密度の小数点以下を表している。

Table 1 試験ケース

CASE	乾燥密度(Mg/m ³)	締固め度 D _R (%)	CASE	乾燥密度(Mg/m ³)	締固め度 D _R (%)
T-50	1.50	81.2	T-66	1.66	89.9
T-56	1.56	84.5	T-68	1.68	91.0
T-57	1.57	85.0	T-75A	1.75	94.7
T-62	1.62	87.7	T-75B	1.75	94.7
T-65	1.65	89.3			

3.3. 水分特性曲線の推定

最終の排水量と最終の供試体の含水比測定の結果から、各時間の供試体内の水分量を逆算して求め、その体積を V_w 、供試体全体の体積を V として算出、各時間における式(1)で表される体積含水率 θ を求めた。また、空気圧センサーで求めた間隙空気圧 u_a とテンシオメータで計測された間隙水圧 u_w を用いて式(2)から間隙水によるメニスカス生成に伴う吸引圧のサクション（cm水頭）を求めた。

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (1)$$

ここに、 θ ：体積含水率、 V_w ：供試体内の水の体積、 V ：供試体の体積 である。

$$h_p = |u_a - u_w| \quad (2)$$

ここに、 h_p ：サクション水頭、 u_a ：間隙空気圧(水頭)、 u_w ：間隙水圧(水頭) である。

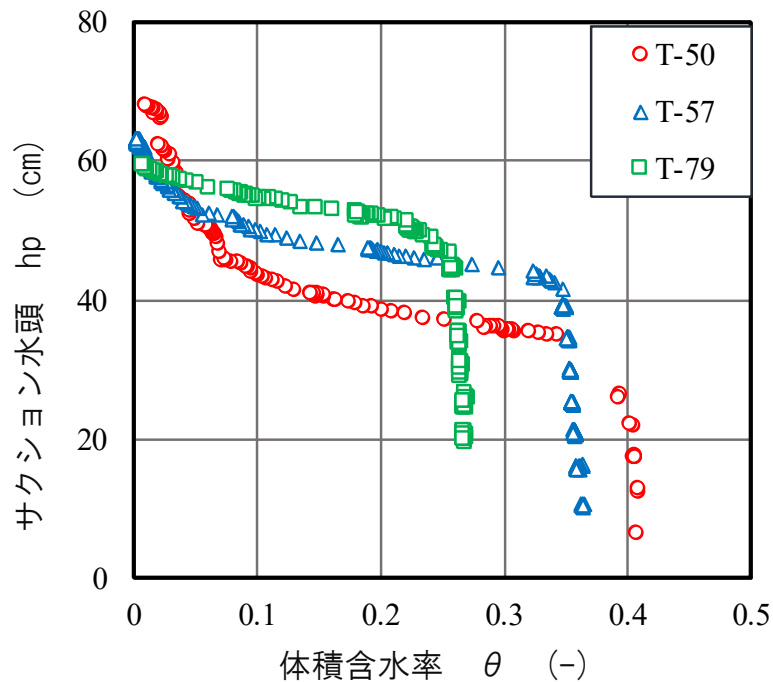


Fig.5 求められた水分特性曲線（排水過程）

9つのCASEのうち3つの得られた水分特性曲線のみをFig.5に示す．水分特性曲線には，排水過程と湿潤過程があるが，今回の実験は間隙くびれ径を求めるために，加圧して排水させていく排水曲線のみを求めている．1分間隔の連続データとして得られるために連続的な水分特性曲線が得られている．

4. 水分特性曲線から得られた間隙径分布と評価指標

4.1. 排水過程の水分特性曲線から得られる間隙径分布

完全に水で満たされていない（不飽和）状態にある土は，Fig.6に示すように粒子間に表面張力によるメニスカスが生成される．一定の固相気相の境界の中，一定の接触角を保とうとする水が表面張力と平衡することで，水の圧力が空気圧を基準として負圧となる．この負圧が不飽和土のサクション（吸引圧）

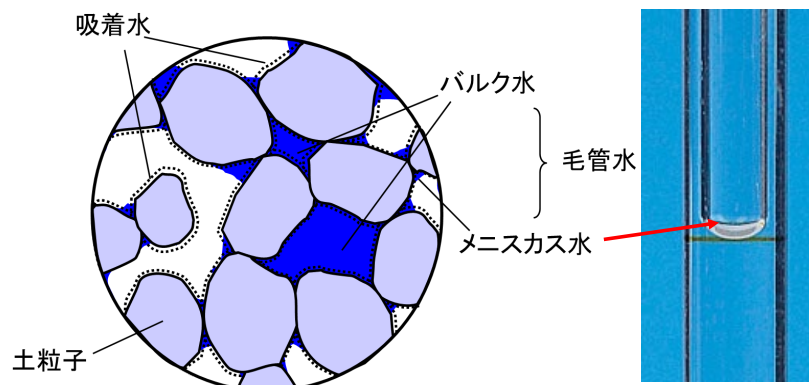


Fig.6 不飽和土中のメニスカス水

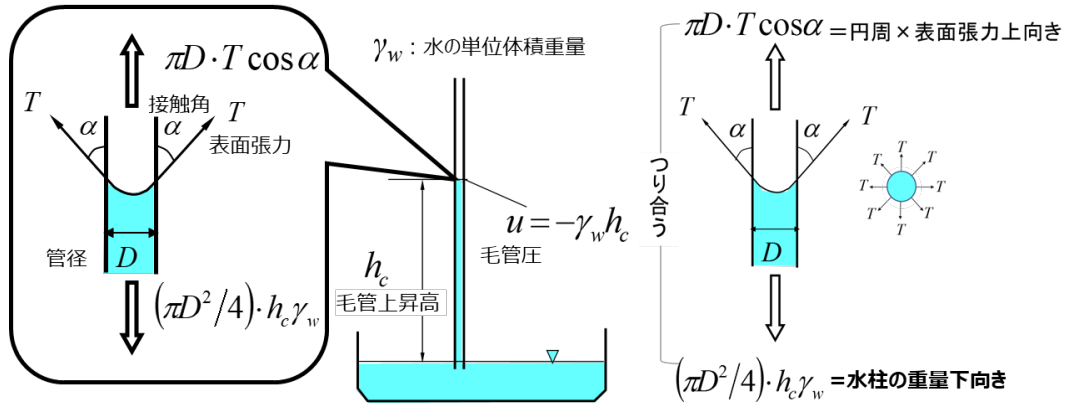


Fig.7 メニスカスによる吸引圧と毛管上昇高

と呼ばれるものである．間隙径の推定には，間隙径を細い毛管の束と仮定し，その管径の大きさに対する毛管上昇高の考え方をを用いる．Fig.7 には，メニスカスによる吸引圧と毛管上昇高に相当等する水の体積による重量とバランスから算出される毛管上昇高の関係を示す．Fig.7 から得られる毛管上昇高の関係式である式(3)を使い，排水過程の水分特性曲線のサクション水頭から毛管径に対応する間隙径を算出する．また，その間隙径より小さな径を有する間隙の累積体積間隙率は，そのサクション水頭と平衡する水分割合である．このことから，飽和の体積含水率 θ_s (=間隙率に等しい) を使って，式(4)に示す有効飽和度から算出する．

$$d_m = \frac{4\sigma}{\rho_w g h_p} m \quad (3)$$

ここに， h_p ：負の間隙水圧， ρ_w ：水の密度(g/cm^3)， g ：重力加速度(cm/s^2)， σ ：水の表面張力(73.46 dyne/cm)である．

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

ここに， Se ：有効飽和度， θ ：体積含水率(-)， θ_r ：最小体積含水率(-)， θ_s ：飽和単位体積含水率(-)である．

式(4)で求められる有効飽和度は，移動できる間隙水 (Fig.6 のバルク水およびメニスカス水) の水分量の割合であり，累積間隙体積率 V_r と考えることができる．得られた間隙径分布の一部と粒度分布を Fig.8 に示す．神谷⁸⁾は，水分特性曲線から得られる間隙径分布を「水分法」として呼び，「水銀圧入法」や「空気圧入法」によって得られる間隙径分布と異なること，また「水分法」による間隙径分布は，粒度分布と形状が類似していることを示した．得られた結果からも形状が類似していることがわかる．また，Fig.9 は，T-50 (乾燥密度 1.50 Mg/m^3) の間隙径分布の差分とともに表した図である．これまでの間隙径分布の差分図は，保水性試験の結果である水分特性曲線のデータが離散的であったため，van Genuten モデル⁹⁾等の関数モデルを仮定して連続データを生成するため，使用する関数モデルの形状で間隙径分布の差分が決まっていた．本実験により，連続的にデータが取得できることから関数モデルの介在がなく，直接間隙径分布を求めることができることも有効であるといえる．

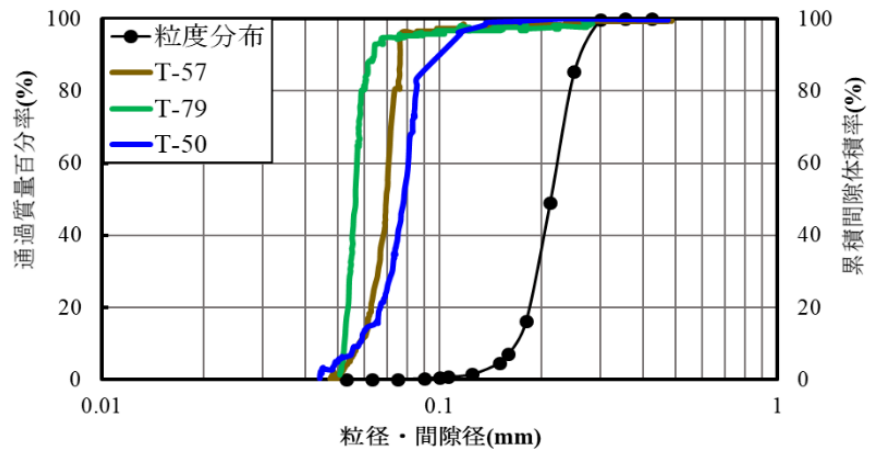


Fig.8 豊浦砂の粒度分布と間隙径分布 (3 種)

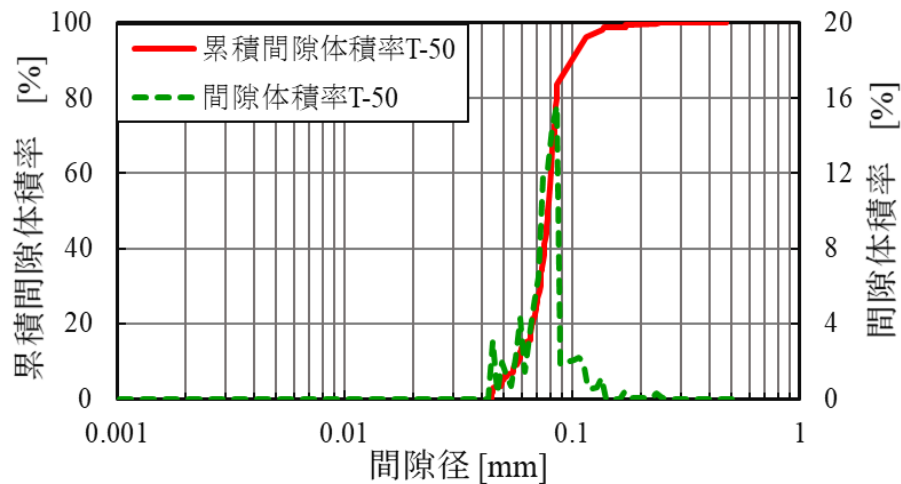


Fig.9 間隙径分布の差分図

4.2. 水分特性曲線から得られる間隙径分布の力学的意味

前述の 2 節で示した Kenney のフィルター安定指標は、間隙径が細くなった間隙くびれ径を評価したものであり、粒度分布の 4 分の 1 (0.25 倍) が一つの間隙くびれ径の分布を推定しているとも読み取れる。そこで、水分特性曲線から得られる間隙径分布が持つ意味について次のように考察した。

Fig.10 は排水過程の水分特性曲線と間隙くびれ内の水分量の関係をイメージしたものである。水分特性曲線は吸引圧である圧力水頭 $|h_p|$ が大きくなるにつれて間隙中の水が排水されていく。毛管上昇の関係からその時、間隙くびれ径が太いものから排水されていき、間隙くびれ径が細いものほど大きな吸引圧が必要となる。いずれも、間隙くびれ径がボトルネックとなって吸引圧と平衡する。また、間隙くびれ径が大きい空隙にも水が残るように見えるが、土中内の間隙は 3 次元的に繋がっており、ボトルネックとなった接点付近の水だけが保水されることが容易にイメージできる。

また、粒度分布と間隙径分布の形状が類似していることから式(5)に示すような間隙粒径比 ξ を提案した。

$$\text{間隙粒径比} \quad \xi = \frac{D_{50P}}{D_{50}} \quad (5)$$

ここに、 D_{50} ：粒度分布における通過質量百分率 50%の粒径， D_{50P} ：間隙径分布における累積間隙体積率 50%の間隙径，である．

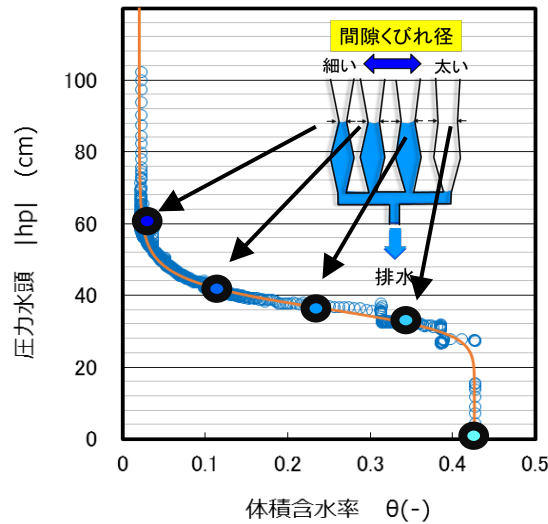


Fig.10 間隙くびれ径と水分特性曲線

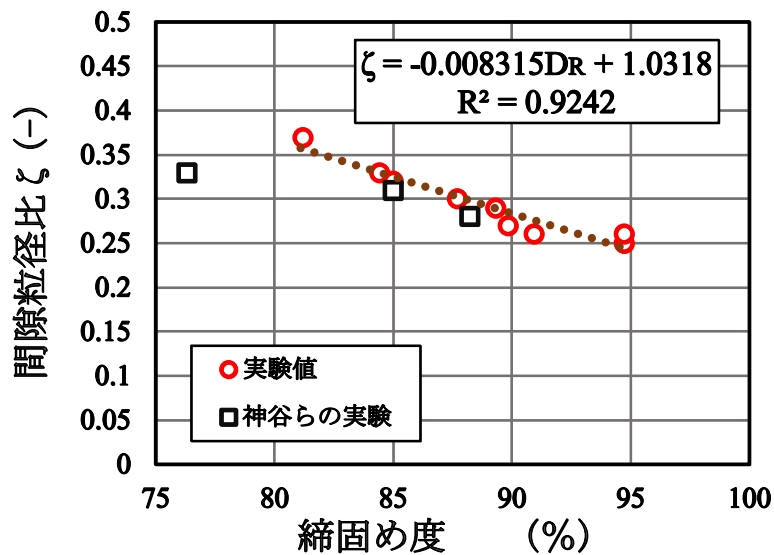


Fig.11 締固め度 D_R と間隙粒径比 ζ

Fig.11 に、今回の実験で得たデータから締固め度 D_R と、豊浦砂の粒度分布を平行移動させたときの間隙粒径係数 ζ (=間隙径分布を粒度分布で除したもの) を示す．なお、神谷らの水分法による豊浦砂の間隙径分布のデータから読み取り、参考までに示した．この結果から、締固め度 D_R が大きくなるほど間隙粒径比 ζ が小さくなっていくことがわかる．また、締固め度 $D_R=95\%$ での間隙粒径比 ζ がほぼ 0.25 であることがわかり、Kenney らの密な状態での間隙くびれがそれを構成する粒径の 4 分の 1 (0.25) と一致することを得た．このことから水分特性曲線から得られる間隙径分布は粒子流出・捕捉(目詰まり)

に關係する間隙くびれ径の分布を示していることがいえる。

次に、こうして得られた間隙くびれ径分布の形状について調べてみるために、間隙くびれ径分布の均等係数「間隙均等係数」 U_{cp} を式(6)のように定義し、締固め度 D_R との關係を表したのが Fig.12 である。

$$\text{間隙均等係数} \quad U_{cp} = \frac{D_{60p}}{D_{10p}} \quad (6)$$

ここに、 D_{60p} ：累積間隙体積率 60%の間隙径、 D_{10p} ：累積間隙体積率 10%の間隙径 である。

Fig.6 より、締固め度 D_R がある値（85%）まで一定であるが、それ以上になると急激に小さくなり、間隙均等係数 U_{cp} は約 1.05 となり、間隙径の大きさが均等になることが推察できる。この結果は、締固め度 D_R が 85%以上になると間隙構造が急激に変化し、強度的には強く、透水性は低くなることが推察でき、堤体や盛土の管理で用いられている D 値管理（85%以上）とも関連していることが考えられる。

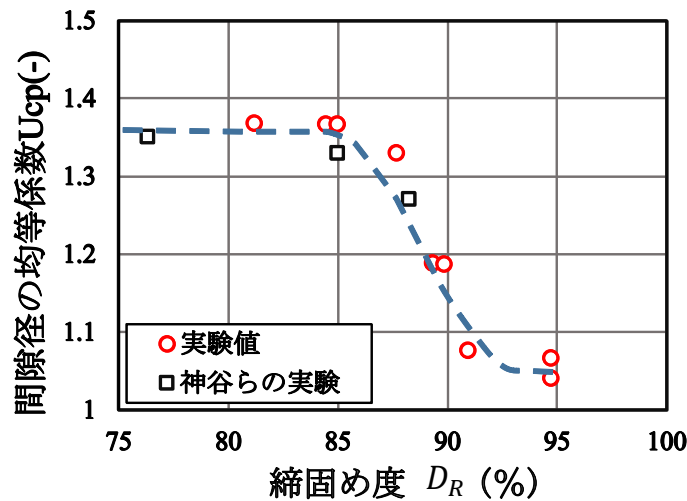


Fig.12 締固め度 D_R と間隙径の均等係数 U_{cp}

5. おわりに

今回、水分特性曲線を用いた砂の間隙径分布の測定による間隙構造を評価する方法を提案した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 試験装置を改良したことで連続的に水分特性曲線を求めることができるようになった。
- (2) 得られた間隙径分布は、Kenney の実験結果と比較し、間隙径が細くなる間隙くびれ径の分布であることが判明し、間隙径分布の意味を明確化した。
- (3) 粗密を評価する「締固め度 D_R 」という指標、また「間隙粒径比 ζ 」を定義し、密になるほど間隙粒径比 ζ が小さくなり、0.25 に近づいていくことが明らかとなった。
- (4) 間隙くびれ径の分布の均等係数「間隙均等係数 U_{cp} 」を定義し、締固め度 D_R が 85%以上になると急激に間隙構造が変化し間隙均等係数 U_{cp} が小さくなり、均等になっていくことがわかった。
- (5) 「締固め度 D_R 」「間隙粒径比 ζ 」「間隙均等係数 U_{cp} 」の關係を導くことができ、粒度分布から簡便に間隙くびれ径分布を推定できることが得られた。
- (6) 間隙くびれ径分布の推定は、逆にみると粒度分布から水分特性曲線を推定できることになり、さらに多種の地盤材料の試験を行っていくことで間隙構造の可視化につながると思われる。

謝辞

本研究は中部大学総合工学研究所 平成 30 年度プロジェクトⅡの援助および JSPS 科研費 18K04353 基盤研究 (C) (代表：杉井俊夫)の補助を受け遂行されたものであり，ここに謝意を表します．

参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会報告書，矢部川堤防調査委員会・国土交通省九州地方整備局，2013.
- 2) 鬼怒川堤防調査委員会報告書，鬼怒川堤防調査委員会・国土交通省関東地方整備局，2016.
- 3) 杉井俊夫・朱発瑜・末松知奈：有効応力から「粒子有効力」へ，間隙率から「間隙径分布」へ，地盤工学会誌，第 66 巻，第 7 号，pp.14-17，2018.
- 4) Baver L.D. : Soil Physics Third Edition, John Wiley & sons, 1940.
- 5) Kenney T.C. and Lau D. : Internal stability of granular filters. Canadian Geotech. J., 22, 215-225, 1985.
- 6) Kenney, T.C., Chahal, R., Chiu, E., Ofoegbu, G.I., Omenge, G.N. and Ume, C.A. : Controlling Constriction Sizes of Granular Filters, Canadian Geotechnical Journal, 22, pp.32-43, 1985.
- 7) 杉井俊夫・川部らら：水分特性曲線を用いた間隙径分布の推定，第 54 回地盤工学研究発表会，印刷中，2019.
- 8) 神谷浩二：砂質土の間隙径分布の評価とその利用，岐阜大学学位論文，107p.，1999.
- 9) van Genuhten, M.Th. : A Closed-form Equation for Predicting the hydraulic Conductivity of Unsaturated soils, Soil Sci.Soc. Am.j., Vol.44, pp.892-898, 1980.