

締固め土の間隙構造

山口晴幸*・池永 均**

粒度組成の異なる12種類の試料について締固め試験を実施し、乾燥側、最適含水比付近、湿潤側での締固め試料について、それぞれ間隙径分を測定し、粒度組成や含水比状態に起る間隙構造の相違について考察を試みている。また土の透水性は間隙構造に支配されることから、含水比に伴う透水係数と間隙構造の推移とを対比させ、締固め土の透水性について微視的に検討を加えている。

Keywords : compacted soil, compaction test, permeability, pore size distribution, pore structure, porosimetry apparatus

1. ま え が き

土の力学的挙動に関するメカニズムを解釈する上で土構造を解明することは非常に重要である。一般に、土構造は力学的挙動に基づいて、その挙動を説明し得るような概念的立場から論じられる場合が多く、土構造に関する実験的事項と直接対比して論じられる場合は少ない。即ち、力学的挙動の土構造からの評価や土構造のモデル化等は、土構造に関する実験的事項が出发点ではなく、巨視的に得られた力学的挙動を鑑みて間接的に想定される場合が多い。そのため、土の構造的解釈やモデル化自体に関する実験的裏付けについてはあまり深く追求されていないようである。この大きな理由として、特に、土質工学の分野では土構造を直接実験的にとらえる有効な手法が試験法として確立されていない点にある。土構造の観察には、一般に、走査型電子顕微鏡による手法が活用される傾向にある。電子顕微鏡では定性的ではあるが視覚的に土構造をとらえるのに有効である。しかし、土粒子の配列状況や骨格構造の変化に関する微視的観察結果を数値化し定量的に処理して、巨視的な力学的挙動の解釈に組み込むまでには至っていないのが現状である。また微小部分でとらえた粒子配列構造が土要素全体を代表し得ているのか否か、トリミングやコーティング操作による乱れによって観察面上での粒子配列構造が土要素内部での状況を再現しているのか否かについて十分に論じられていない。これに対して、ポロシメータ装置を用いて土構造を間隙構造から微視的に評価しようとする研究がある。ポロシメータ装置では土粒子の配列及び土粒子や個々の間隙形状について判定することはできないが、測定に土要素を代表し得る比較的大きな試料（一辺

が約1 cmの立方体）を用いることができ、しかも径の幅広い範囲（約0.005～500 μm）に亘る間隙を連続的に測定することができることから、微視的な土構造に関する情報を数値化して定量的に表示できる利点がある。

間隙径分布の測定原理は、当初、多孔質材料の間隙構造を調べる目的で Washburn¹⁾によって提案された。現在、土の間隙径分布の測定方法としてアメリカでは ASTM で標準化されている²⁾。土の間隙径分布に関する研究のほとんどは国外で実施されており、締固め土を対象として締固め条件や締固め方法に起因する間隙構造の変化や間隙構造と透水性等との関係について論じられている^{3)~8)}。Bengochea ら³⁾は粘土とシルトの混合土では間隙径分布の形状は2つのピークを有する2モード型の曲線形状を呈し、第1ピークを示す大きい間隙（ベッド間隙）のモードに締固めエネルギーや含水比の影響が大きく現われることを指摘している。粘土を用いた Ahmed ら⁴⁾の研究でも締固め方法の相違よりもむしろ、含水比の影響が間隙径分布を大きく支配していることが検証されている。Juang ら⁵⁾は砂の場合には間隙径分布は1モード型の曲線形状を呈するが、砂と粘土の混合土では、Bengochea ら³⁾の指摘と同様に、2モード型の曲線形状に移行し、第1ピークを示す大きい間隙径の頻度が締固めエネルギーと含水比のみならず粘土含有率の増加に伴い減少するが、小間隙径領域で現われる第2ピークのモードにはほとんど変化が認められないことを報告している。粘土についての Mckinlay ら⁸⁾の研究では、乾燥側で見られる2モード型の間隙径分布の曲線形状は、最適含水比と湿潤側では第1ピークのモードを消失して小間隙径領域での第2ピークの間隙頻度が増大する1モード型に変化することを指摘している。上述のように、締固め土の間隙構造に関する各研究者による知見は、土質の種類や締固め条件によってかなり異なっている。なお、間隙径分布の測定結果は主に透水性のメカニズム

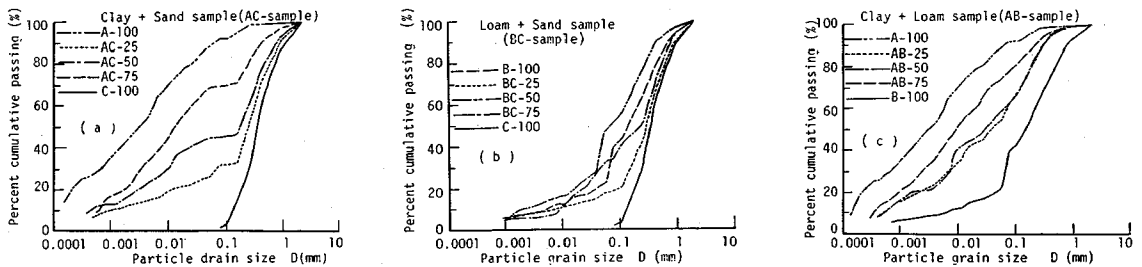
* 正会員 工博 防衛大学校助教授 土木工学教室
(〒239 横須賀市走水1-10-20)

** 学生会員 防衛大学校 理工学研究科学生

表一 各試料土の物理的性質

Samples	AC-Sample				BC-Sample					AB-Sample		
	Clay (100%)	Clay(75%) + Sand(25%)	Clay(50%) + Sand(50%)	Clay(25%) + Sand(75%)	Loam (100%)	Loam(75%) + Sand(25%)	Loam(50%) + Sand(50%)	Loam(25%) + Sand(75%)	Sand (100%)	Clay(75%) + Loam(25%)	Clay(50%) + Loam(50%)	Clay(25%) + Loam(75%)
	A-100	AC-75	AC-50	AC-25	B-100	BC-75	BC-50	BC-25	C-100	AB-75	AB-50	AB-25
G_s	2.615	2.648	2.712	2.701	2.644	2.674	2.701	2.720	2.774	2.623	2.656	2.637
w_L (%)	42.0	33.4	27.5	21.2	41.9	36.6	22.4	-	-	43.0	42.6	41.2
w_p (%)	17.3	14.6	13.5	-	28.9	25.3	19.1	-	-	19.9	24.1	27.1
I_p	24.7	18.8	14.0	-	13.0	11.3	3.3	-	-	23.1	18.5	14.1
U_c	47.3	96.9	420	350	11.1	60.1	44.2	28.6	2.51	63.3	150	163
F (%)	92.3	69.0	44.8	31.9	39.2	33.4	49.1	18.4	0	78.5	62.5	62.4
SC	FGS	FGS	CGS	CGS	CGS	CGS	CGS	CGS	CGS	FGS	FGS	FGS
$(\rho_d)_{max}$ (α/cm^3)	1.655	1.765	1.884	1.889	1.522	1.571	1.621	1.693	1.552	1.758	1.641	1.587
w_{opt} (%)	16.63	17.01	13.62	13.84	25.42	20.91	22.14	17.62	17.90	17.16	21.31	22.26

Note: G_s =specific gravity, w_L =liquid limit, w_p =plastic limit, I_p =plastic index, U_c =uniformity coefficient, F =fine particle fraction, SC=soil classification, FGS=fine grained soil, CGS=coarse grained soil, $(\rho_d)_{max}$ =maximum dry density, w_{opt} =optimum moisture content.



図一 各試料土の粒度分布曲線

を解釈するのに反映されている。特に, Bengochea³⁾は毛管モデルに基づき, 間隙径パラメータと間隙形状を評価するパラメータを組み込んだ透水係数式を誘導し, その妥当性について検証している。また Juang⁵⁾は間隙径分布を表現するための密度関数を導入した透水係数式を提案し, 締固め土の透水性を微視的立場から定量的に評価することを試みている。このように, 間隙径分布の測定は土構造を微視的に考察し工学的性質の解釈に有効であることが示唆される。

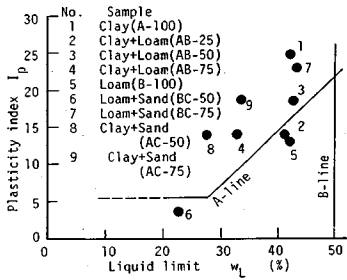
本研究でも同様の主旨から締固め土の透水性等の工学的性質を土構造の観点から論じるための基礎的事項を実験的に把握することを目的として, 土の間隙径分布の測定手法を締固め土に適用した。ここでは, 粒度組成の異なる12種類の試料土について締固め試験を実施し, 乾燥側, 最適含水比付近, 湿潤側での締固め試料について, それぞれ間隙径分布を測定し, 粒度組成や含水比状態に起因する間隙構造の相違について考察を試みる。また土の透水性は間隙構造に支配されることから, 含水比に伴う透水係数と間隙構造の推移とを対比させ, 締固め土の透水性について検討を加えた。

2. 試料と実験方法

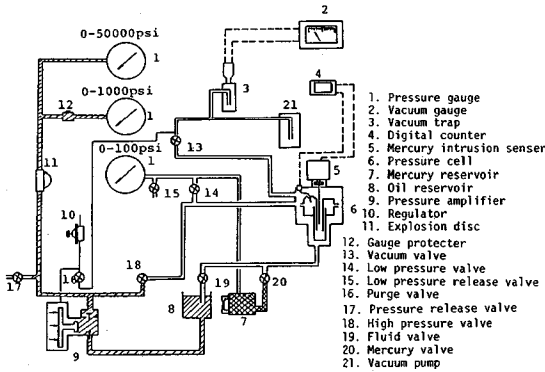
(1) 実験に用いた試料

締固め土の間隙構造を広範囲に亘って調べるために,

粘土や砂の含有量を調整した粒度組成の異なる12種類の試料を用いた。試料は粘土(A試料), 砂(C試料), ローム(B試料)の三つの試料を基調として互いに二つの試料を各種の質量比で混合して作製した粘土+砂試料(AC試料), ローム+砂試料(BC試料), 粘土+ローム試料(AB試料)からなる。粘土(市販の木節粘土)は420 μ mふるいで, 砂(神奈川県足柄郡産の川砂)とローム(東京都青梅市産の関東ローム)はそれぞれ2mmふるいで調整して用いた。表一と図一には各試料の物理的性質と粒度分布曲線を示している。混合試料では二つの試料の質量比を乾燥質量で25%毎に変化させた。試料名は英字A(粘土), B(ローム), C(砂)やそれらの組合せ(AB, BC, AC)で表示し, 英字の後の数字は頭英字の試料の質量比を表すことにする。これらの試料の I_p と w_L の関係を図二にプロットしている。 I_p は約25, w_L は約43%範囲にあり, B線より左方に位置し概ねA線に沿って塑性が変化している試料である。なおローム試料は採取時の含水比が約23%であったが, 約11%の含水比まで気乾燥して使用している。これは, 最大粒径を規定し砂試料と同一の最大粒径(2mm)に調整するためのふるい操作を容易にするためである。しかし, 一般にロームの工学的性質は, 乾燥の影響をかなり受けると言われており³⁾, 次節以降で述べる締固めや間隙径分布の測定結果には乾燥の影響も含



図—2 各試料土の I_p と w_L との関係



図—3 ポロシメータ装置の系統図

まれていることを念頭に入れる必要がある。

(2) 実験方法

各試料について 100 mm モールドと質量 2.5 kg のランマー（落下高さ 300 mm）を用いて突固め条件を 3 層 25 回に固定して締固め試験を実施した。締固め方法は乾燥法・非繰返し法とした。また締固め土の透水性と間隙構造との関係について調べるために、ローム試料（B-100）を用いて締固め後、変水位透水試験を実施し飽和時の透水係数の測定を行った。

締固め及び透水試験後試料をモールドから取り出し、試料の中心箇所からトリミングした一辺が約 10 mm の立方体試料を間隙径分布測定のためにフリーズドライ法によつて乾燥した。フリーズドライ法は乾燥による土の体積収縮をほとんど抑えて乾燥でき、その有効性については既に Ahmed ら⁴⁾と Zimmie ら⁷⁾によつて詳細に報告されている。Ahmed ら⁴⁾によると、フリーズドライ法と炉乾燥法による試料についての間隙径分布の測定結果の比較から、飽和度約 50% 以下の乾燥側の試料では炉乾燥による体積収縮は非常に小さく、間隙径分布の測定には乾燥収縮の効果はほとんど問題にならないとしている。しかし、飽和度 50% 以上の特に湿潤側の試料では、炉乾燥による体積収縮が 20% 程度となり、乾燥収縮の効果が測定結果に顕著に現われ信頼性が損なわれることから、フリーズドライ法による乾燥方法を推奨している。本実験に用いた各試料でのフリーズドライ法での乾燥収

縮は最大で約 0.3% と非常に小さかったことから、間隙径分布の測定結果にはその影響を考慮しなかった。

間隙径分布の測定には水銀圧入型ポロシメータ装置を使用した。図—3 に本装置の系統図を示す。フリーズドライした試料を直ちにポロシメータ装置内の圧力セル室（図—3 中の番号 6 の部分）にセットし、高真空状態に保ち試料の脱気を約 5 時間行う。試料の脱気が完了した後、セル室を水銀で満たし高真空下で約 1 時間、再度脱気する。間隙径分布の測定は、まず、真空圧を徐々に開放し、引き続き油圧により水銀を介して等方圧力を作用して、試料内の間隙に水銀を圧入する。間隙の体積（累積間隙体積）は圧入された水銀の累積量を試料の単位乾燥質量当りに換算して求める。間隙径 (d_p) は Washburn が提案した次式¹⁾を用いて求めた。

$$d_p = -\frac{4\sigma\cos\theta}{p}$$

ここで、 σ は水銀の表面張力、 θ は水銀と試料の接触角、 p は圧入圧力であり、 $\sigma = 484 \text{ dynes/cm}$ 、 $\theta = 147^\circ$ とした。土の間隙構造は土粒子骨格構造と表裏一体の関係にあるが、ポロシメータ装置による測定結果では土粒子の形状や配列状況を判定することはできない。上式で示すように、土の間隙を連続した円筒形と仮定し、間隙に水銀を圧入する際の圧力 (p) と間隙周面での水銀の表面張力との釣合から間隙径 (d_p) を算定している。そのため、水銀を圧入する圧力範囲によって測定可能な間隙径範囲や間隙体積が決定される。本実験で採用したポロシメータ装置では絶対圧 0 付近から 50 000 psi (約 350 MPa) までの圧力を作用することができ、約 400 μm ~ 0.005 μm 範囲の間隙径 (d_p) の測定が可能である。

3. 各試料の締固め特性

土の締固め特性や締固め土の工学的性質に関しては、多くの研究業績や出版物がある。ここでは次節で論じる締固め土の間隙構造を解釈するために必要な代表的な試験結果について記述する。各試料の締固め曲線をそれぞれ図—4 (a)~(c) に示す。図—4 (a) と (b) の結果では、粘土 (A-100) とローム (B-100) にそれぞれ砂がある程度混入すると粘土とロームがそれぞれ単独の場合に比較して締固め特性が改善され、砂の質量比が 50% と 75% での締固め曲線が最も上方に位置している。図—4 (c) に示す粘土+ローム試料では、ロームの質量比が増加するに従い密度が低下し、ローム試料 (B-100%) の締固め曲線が最も下方に位置している。各試料での最大乾燥密度 (ρ_d)_{max} を最適含水比 (w_{opt}) との関係で示したのが図—5 である。粒度組成は異なるが、各試料間で w_{opt} が小さい試料ほど (ρ_d)_{max} が小さく、粘土に砂を 50% と 75% 混合した試料が (ρ_d)_{max} の最も大きな値を示している。図—6 に (ρ_d)_{max} と均等係数 (U_c)

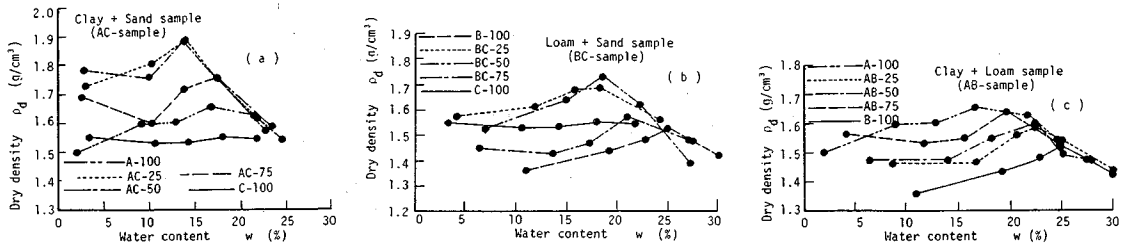


図-4 各試料土の締固め曲線 (3層25回)

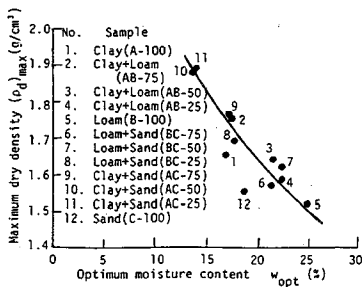


図-5 $(\rho_d)_{max}$ と w_{opt} との関係

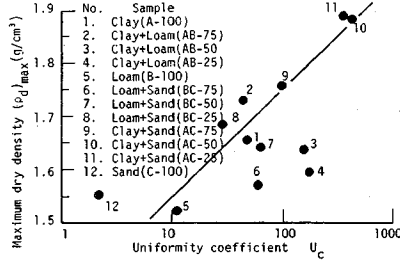


図-6 $(\rho_d)_{max}$ と U_c との関係

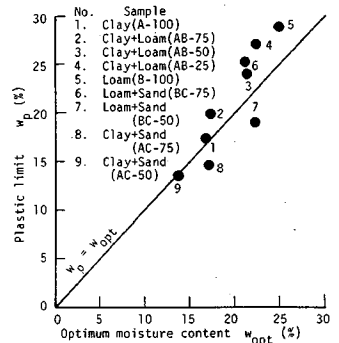


図-7 w_p と w_{opt} との関係

との関係を、また図-7に塑性限界 (w_p) と w_{opt} との関係をそれぞれ示してある。多少ばらつきはあるが、 U_c が大きく粒度配合の良い試料ほど $(\rho_d)_{max}$ は大きく、しかも、各試料での w_{opt} はほぼ w_p と近似し、 w_{opt} と w_p との間には比例的関係が存在している。周知のように、本実験で用いた試料でも、粒度配合が良く低塑性限界の試料ほど締固めによって密度が大きくなっている。

4. 締固め土の間隙構造

締固め土の構造は含水比や締固めエネルギーによって変化することは周知のことである。Lambe¹⁰⁾は含水比が増加すると粘土粒子の表面にイオン拡散二重層が発達し粒子は配向化する傾向を持ち、また締固めエネルギーが増加すると粒子の配列は密になると共に配向化する傾向も強まることをイオン拡散二重層理論と希薄コロイド溶液中の粘土粒子の挙動などから理論的に説明している。Bardenら¹¹⁾は走査型電子顕微鏡による写真分析から、締固め粘土の構造を“deformable aggregate soil model”に基づいて説明し、締固め特性はベッド(粘土粒子が凝集した団粒)の状態に左右されていることを指摘している。即ち、個々のベッドの強度や形状は含水比状態に依存し、乾燥側ではベッドの強度が高く外力に対する抵抗力も大きく変形しにくいから、間隙の状態はベッド間隙が多く、これが連続的に連絡した構造を形成している。しかし、最適含水比状態、湿潤側と含水比が増加するにつれてベッドの強度が低下し変形性が増すため、ベッド間隙に変化が生じて粒子の再配向を起こすこともあるが、ベッド内間隙は含水比状態によって変化を受けない

表-2 松尾らにより提案されたベッドとポアの相関性¹²⁾

ベッド (ped)	ポア (pore)
マクロベッド (>50 μm)	マクロポア (>10 μm)
メソベッド (2~50 μm)	メソポア (1~10 μm)
マイクロベッド (0.1~2 μm)	マイクロポア (0.01~1 μm)
サブマイクロベッド (<0.1 μm)	サブマイクロポア (<100 Å)

としている。Shridharanら⁶⁾による締固め粘土の間隙径分布の測定結果では、0.14 μm 以上の間隙径領域に含水比や締固めエネルギーの影響が現われ、0.14 μm 以下の間隙は変化しないことが報告されており、上述の“deformable aggregate soil model”の裏付けを与えている。松尾ら^{12)~16)}は土の構造は粘土鉱物の板状粒子が単独で存在することはほとんどなく、程度の差はあっても凝集した団粒(ベッド)によって構成されているとし、表-2に示すように、構造を構成する基本単位として団粒についてはベッドを、その回りの間隙についてはポアをそれぞれ用いることを提案し、ベッドとポアの相互関係によってランダム構造や配列構造をとるとした。また圧密過程中的ベッドとポアの出現状況から、マクロポア(ベッド間隙)のような大きなポアが圧縮されて小さなポアに遷移し、ベッド粒径は均一化するがマイクロベッドのような小さなベッドは攪乱や含水比の影響をほとんど受けないことを電子顕微鏡写真のトレース分析から明らかにしている。そこで、上述の研究成果を背景に、本実験での締固め土の間隙構造について考察する。

(1) 累積間隙体積曲線

間隙径に測定範囲(約0.005 μm~400 μm)があるこ

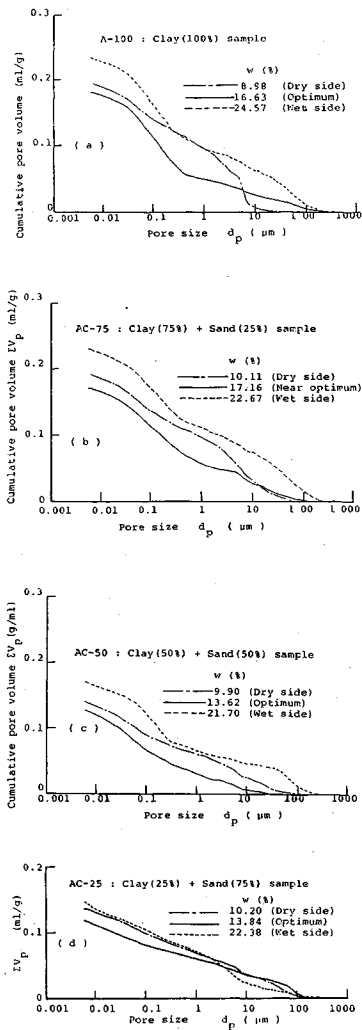


図-8 累積間隙体積曲線 (AC 試料)

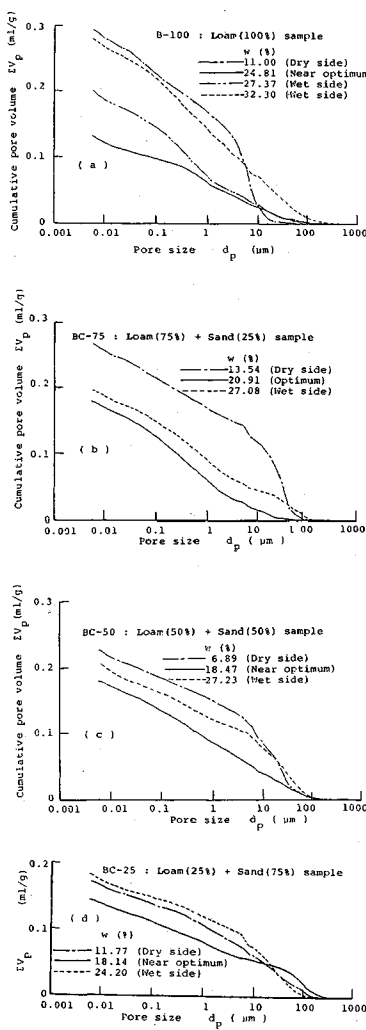


図-9 累積間隙体積曲線 (BC 試料)

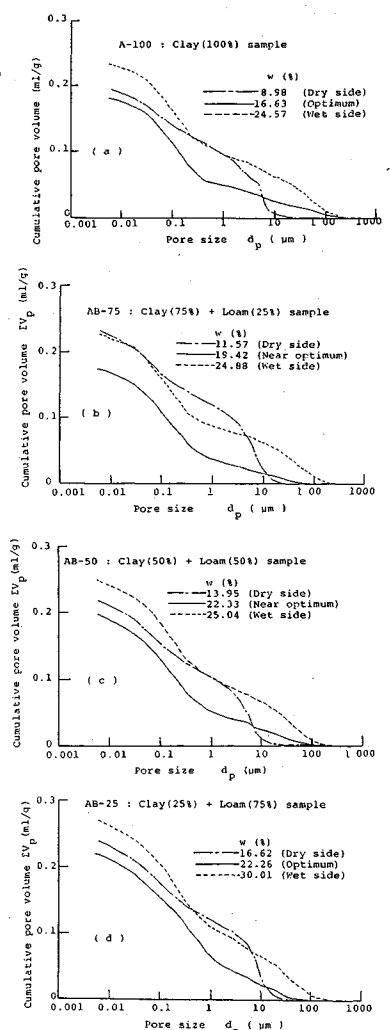


図-10 累積間隙体積曲線 (AB 試料)

とから、測定不能な小間隙径領域 (約 $0.005 \mu\text{m}$ 以下) での間隙の存在や結果の信頼性を把握するうえで、累積間隙体積曲線の形状や累積間隙体積と間隙比との関係について検討することが重要である。図-8~10は、各試料での締め土の累積間隙体積 (ΣV_p) を間隙径 (d_p) との関係で表示した累積間隙体積曲線を示す。各図中には、乾燥側、最適含水比 (付近) 状態、湿潤側での結果を併記している。各締め土では、約 $100 \mu\text{m}$ 以下の間隙を主体とした間隙構造が形成されており、小間隙径領域での累積間隙体積曲線の上昇傾向から、実測可能な約 $0.005 \mu\text{m}$ よりもさらに小さな間隙の存在が予想できる。また約 $10 \mu\text{m}$ 以上の間隙径領域では最適含水比状態での曲線 (実線) は乾燥側のそれ (一点鎖線) より多少上方に位置している箇所もあるが、乾燥側と湿潤側 (破線) の曲線よりほとんど下方に位置し、各 d_p に対応する ΣV_p の値が小さくなっている。これは、図-4での締

め曲線で示したように、最も締められた状態が最適含水比の状態であることを裏付けている。各試料で質量比の影響について着目すると、粘土+砂試料とローム+砂試料の場合では、砂の質量比が増加するに従い各 d_p での ΣV_p は減少し、図-4 (a) と (b) で示した締め曲線と対応して締め特性が改善されていることがわかる。しかも砂の質量比が75%と砂主体の試料 (AC-25, BC-25) では、 $\Sigma V_p \sim d_p$ 曲線は最適含水比状態でのそれとかなり近似している。

図-11と図-12に全間隙体積 (ΣV_p) を乾燥密度 (ρ_d) と間隙比 (e) との関係でそれぞれがプロットしている。 (ΣV_p) は図-8~10に示した d_p が約 $0.005 \mu\text{m}$ までの累積間隙体積 (ΣV_p) である。両図に見られるように、 (ΣV_p) と ρ_d あるいは e との間には概ね一義的な関係が存在している。最適含水比状態での結果 (●印) は乾燥側 (○印) と湿潤側 (●印) に比較して両関

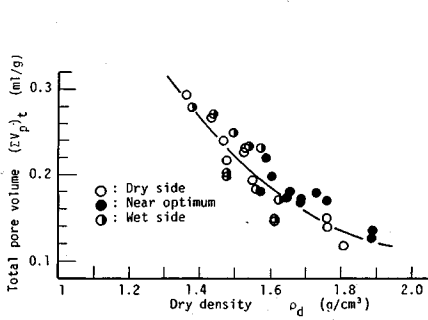


図-11 $(\Sigma V_p)_t$ と ρ_d との関係

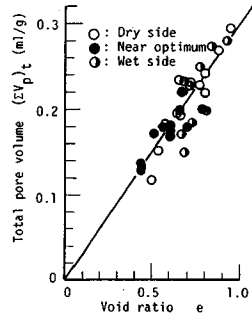


図-12 $(\Sigma V_p)_t$ と e との関係

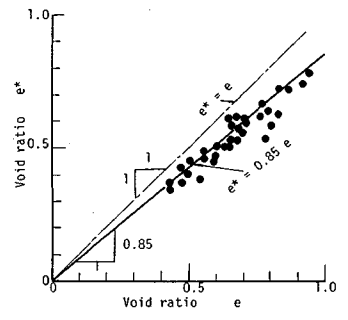


図-13 e^* と e との関係

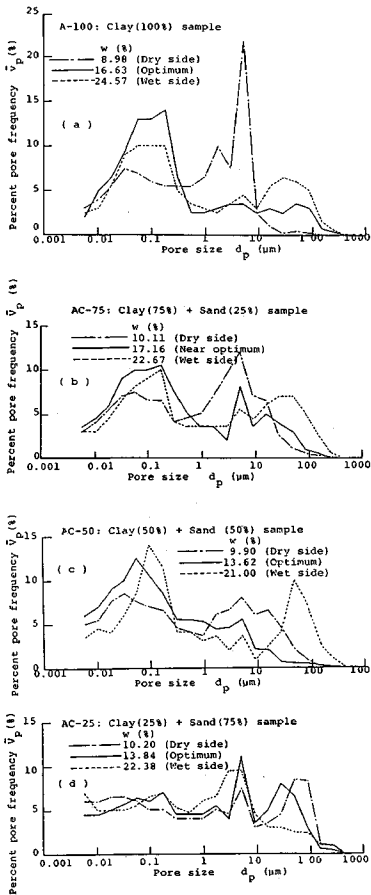


図-14 間隙体積頻度分布 (AC 試料)

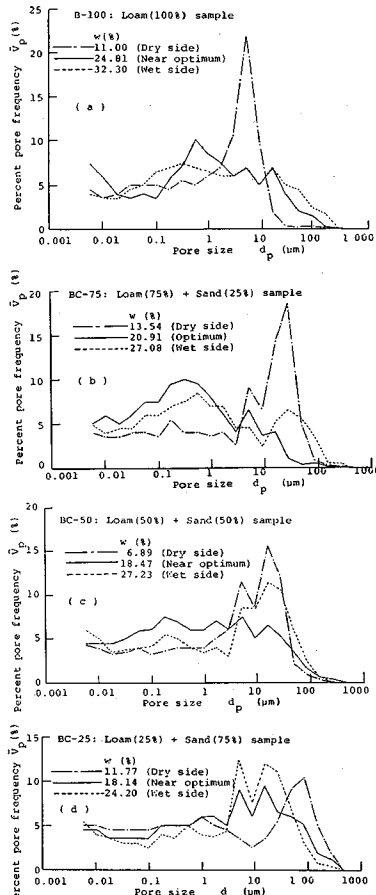


図-15 間隙体積頻度分布 (BC 試料)

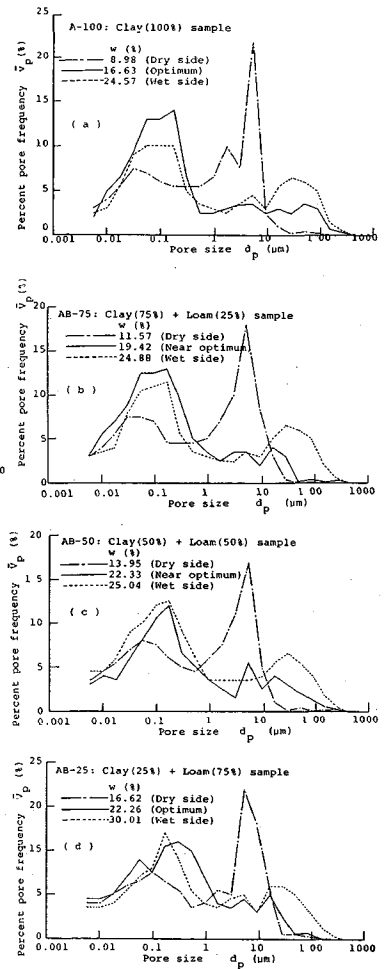


図-16 間隙体積頻度分布 (AB 試料)

係線の下方に概ねプロットされる。試料の全間隙体積を $(\Sigma V_p)_t$ と仮定して算定した間隙比 (e^*) を、通常的手法 (ρ_d と G_s を用いて求める) で求めた間隙比 (e) と対比したのが図-13である。 e^* は e とかならずしも一致していないが両者間に直線的関係が存在し、 e^* は e の概ね 85% の値を示している。 e^* が試料の間隙比を過少な評価すること、 e^* と e との不一致性に関する主な理由として次のことが考えられる。

① e^* を算定する際の全間隙体積を d_p が約 0.005 μm までの累積間隙体積 ($(\Sigma V_p)_t$) と仮定している。しかし、図-8~10 に示した累積間隙体積曲線の傾向から、小間隙径領域でも曲線上昇傾向が認められ、 $d_p < 0.005 \mu\text{m}$ 領域での間隙がまだ存在していると考えられるが、それが考慮されていないこと。

② 2節で記述したように、フリーズドライ法でも最大で0.3%程度の乾燥収縮が生じているが、この影響を無視していること。

③ 微視的に求めた間隙比 (e^*) と通常的手法による間隙比 (e) との間の測定精度に相違があること。

上記①と②項のは試料の間隙比を過少に見積もることになる。特に、②項よりむしろ①項により、 $d_p < 0.005 \mu\text{m}$ 領域の間隙の存在を無視していることが間隙比を過少に見積もる主因をなしていると考えられる。一方、③項が過少か過大見積りになるか否かについて定量時に評価することは難しいが、いずれにせよ e^* と e の不一致の原因をなすものと言える。

(2) 間隙体積頻度特性

締固め土の間隙構造に関する理解を容易にするために、間隙体積頻度分布を図-14~16に示す。頻度 (\bar{V}_p) は、各間隙径に対応する間隙体積を全間隙体積 ($\sum V_p$) で除して百分率で表示してある。各試料間での頻度分布に多少ばらつきは認められるが、含水比の相違による締固め土の間隙構造の変化に、概ね規則的な傾向が認められる。いずれの試料においても乾燥側(一点鎖線)では d_p が $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ あるいは $10 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲に際立ったピークを示す頻度 (\bar{V}_p) の間隙が存在し、比較的大きな d_p の間隙を主体とした間隙構造が形成されている。即ち、図-14と図-15に見られるように、粘土+砂及びローム+砂試料では、乾燥側での最大頻度を示す d_p は砂の質量比の増加と共に漸次大きくなる。しかも最大頻度の値も減少することから、砂の質量比に伴って比較的均一な頻度分布から広範な径に亘る様な頻度分布へと間隙構造が推移していくことがわかる。しかし、図-16での粘土+ローム試料では粘土とロームにそれぞれ砂を混合した場合に比較して質量比による頻度分布の変化が小さい。含水比の相違に着目すると、乾燥側から最適含水比状態及び湿潤側に移行するに従い、各試料での頻度分布に大きな変化が認められる。まず最適含水比状態での頻度分布(実線)では、乾燥側で際立ったピークを示した間隙径での頻度が減少し、逆に、 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 範囲に頻度のピークが現れる場合が多く、間隙構造を形成している間隙の主体が小間隙径領域に移行している。しかし、湿潤側(破線)では、最適含水比状態でピーク頻度を示した間隙に加え、再び間隙径の大きな領域にも頻度のピークが現われる2モードの分布型を示す間隙構造を呈する場合が多い。特に、図-16での粘土+ローム試料での頻度分布では、湿潤側で再び増加する間隙は、乾燥側でピーク頻度を示す間隙径より約1オーダー程度大きくなっている。

このように、締固め土の間隙構造は試料の粒度組成や混合する土質の種類によって異なるが、大略的には、松尾ら¹²⁾が定義したマクロポア ($> 10 \mu\text{m}$) からメゾポア (1

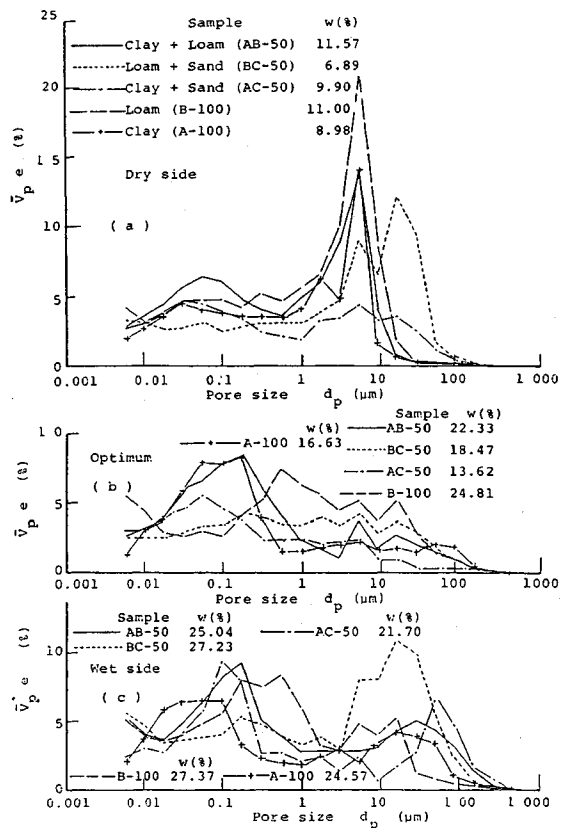


図-17 間隙頻度分布(乾燥側,最適含水比状態,湿潤側)

$\sim 10 \mu\text{m}$) 範囲(表-2参照)の大きな間隙径領域での間隙頻度が乾燥側から湿潤側への含水比増加によって変化し、その結果、小間隙径領域でのミクロポア ($0.01 \sim 1 \mu\text{m}$) の間隙頻度に変化をもたらしているものと考えられる。即ち、Bardenら¹¹⁾や松尾ら¹²⁾⁻¹⁶⁾によって指摘されているように、土粒子が凝集した団粒間やマクロベッド間の間隙頻度に大きな変化が生じている。しかし、図-14と図-15に示したように、粘土やローム試料に砂を混合した場合、砂の質量比が増加するにつれて粘土粒子によるベッドの形成が低下するため、間隙構造に及ぼす含水比の影響も低減し、AC-25(図-14(d))とBC-25試料(図-15(d))では、 $1 \mu\text{m}$ 以下(ミクロポア)の間隙頻度にほとんど相違のない結果となっている。また、Bengocheaら³⁾やJuangら⁵⁾の指摘のように、ほとんどの試料において、湿潤側では2つのピークを有する2モード型の頻度曲線を示しているが、乾燥側や最適含水比状態ではむしろ1モード型の曲線形状に近い。さらに乾燥側で示す2モード型の曲線形状は最適含水比状態と湿潤側では、第1ピーク頻度(大きい間隙径)の消滅により、第2ピーク頻度(小さい間隙径)が増加して1モード型に推移すると指摘している Mckinlayら⁸⁾の結果とも異なっている。なお、粘土の質量比が50%

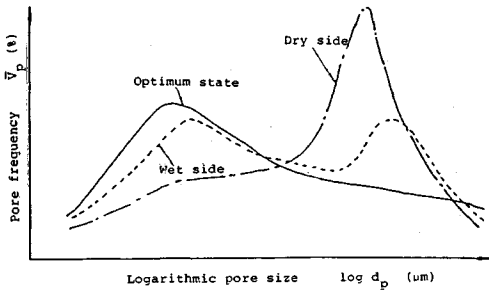


図-18 締固め状態による間隙頻度分布の図式化

までの AC と AB 試料での湿潤側の第 2 ピーク頻度は第 1 ピーク頻度より大きく最適含水比状態での第 2 ピーク頻度の値に近いことから、Lambe¹⁰⁾が指摘しているように、含水比の増加に伴う土粒子の配向化が強く現われているものと推察される。

そこで、代表的試料について、乾燥側、最適含水比状態、湿潤側で区別し、頻度分布を同一面上にプロットしたのが図-17 である。ここでは、試料間での間隙比の相違を考慮して、縦軸は間隙頻度 (\bar{V}_p) に間隙比 (e) を乗じたパラメータ ($\bar{V}_p e$) で表示してある。試料間で最大頻度の値や最大頻度を示す間隙径の位置は多少異なるが、乾燥側では $1\mu\text{m} \sim 100\mu\text{m}$ 範囲に際立った 1 つのピーク頻度を有する比較的均一な間隙構造が形成される。また最適含水比状態では、ピーク頻度の位置が小間隙径領域にあり、間隙径が広範囲に亘る 1 モード型の間隙構造が形成される。さらに湿潤側では、小間隙径領域に 1 つと大間隙径領域に 1 つピーク頻度を有する 2 モード型の間隙構造が形成される。以上のことから本実験での締固め土の間隙構造は大略的に図-18 に示すように図式化できる。

なお間隙構造と粒度配合との関係を見るために、粗粒土と細粒土に大別して再整理したのが図-19 と図-20 である。最適含水比状態を境として間隙構造が大きく変化するので、最適含水比状態での間隙頻度を基準としてその頻度との差 ($\Delta \bar{V}_p e$) として乾燥側と湿潤側の頻度分布を示している。粗粒土では粗粒分 (F^*) が 50.9% ~ 81.6% 範囲、細粒土では細粒分 (F) が 62.4% ~ 92.3% 範囲にある。両図に見られるように、乾燥側と湿潤側での頻度分布には粗粒分や細粒分による規則的な変化傾向は認められない。粗粒土の場合 (図-19) には、特に、乾燥側での約 $1\mu\text{m}$ 以上のメゾポアからマクロポア領域での間隙頻度に見られるように、粗粒分よりもむしろ、混合する土質の種類や混合割合によって間隙構造は支配されている。これに対して、細粒土の場合 (図-20) には、細粒分にあまり左右されない結果を示しており、土質の種類や混合割合の影響はあまり認められない。このようなことから、締固め土の間隙構造は粗粒分や細粒分

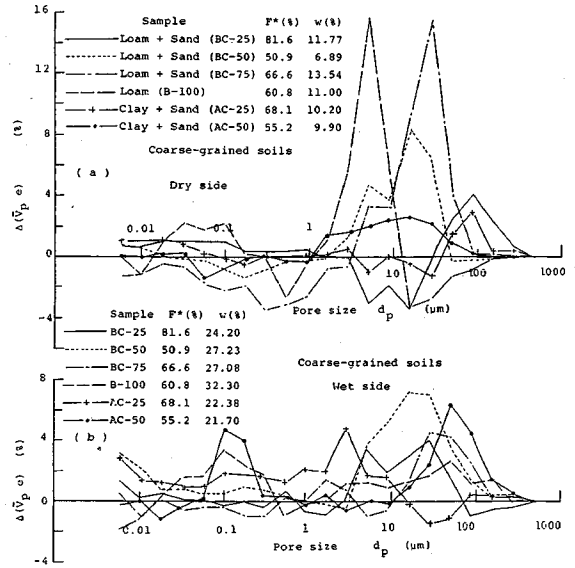


図-19 粗粒土に分類される試料の間隙頻度分布

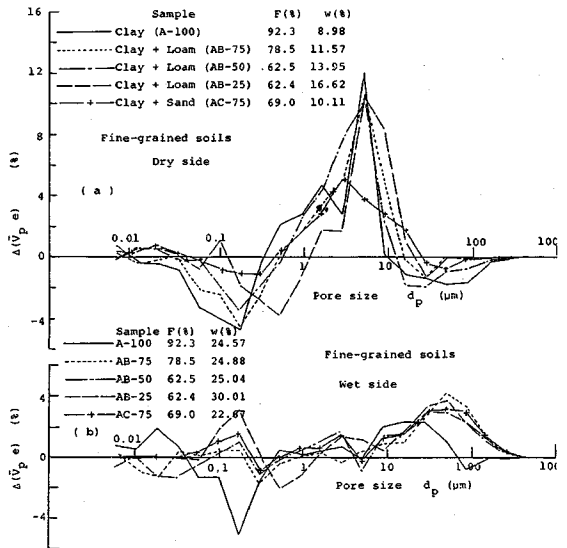


図-20 細粒土に分類される試料の間隙頻度分布

の含有量のみによって一義的に論じることは難しく、締固め特性が粗粒分や細粒分を構成している土質の種類や粒度組成によって支配されることから、これらの因子を考慮する必要がある。

5. 透水性

土の透水性と間隙構造の間には密接な関係が存在している。Shridharan ら⁶⁾、Ahmed ら⁴⁾、Bengochea ら³⁾も締固め土の透水性について間隙構造の観点から既に論じており、透水性のメカニズムを解釈するのに含水比に起因する間隙構造の変化を把握することが重要であるこ

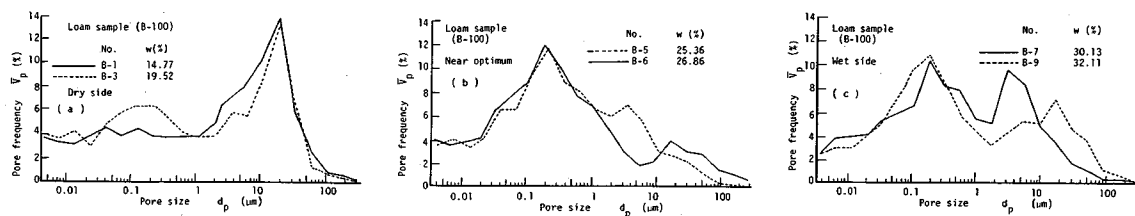


図-23 各締固め状態での間隙頻度分布の比較

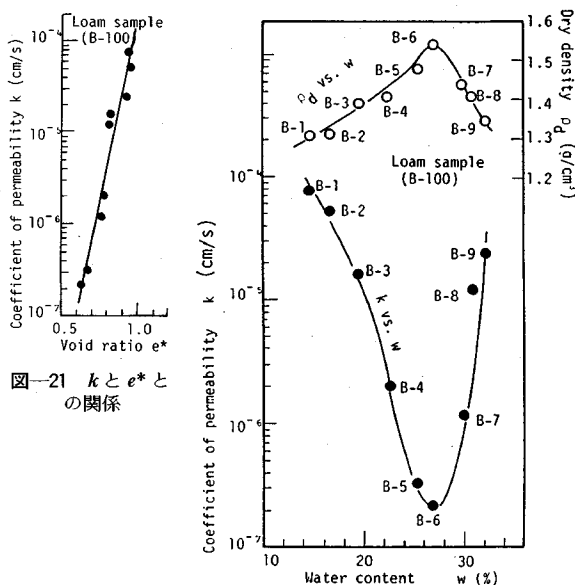


図-21 k と e^* との関係

図-22 k と w との関係

とを指摘している。そこで、各種の含水比 (w) で調製したローム試料を締固めた後水浸し、飽和状態で透水係数 (k) の測定を行った。透水試験後、間隙径分布の測定も同時に実施した。

図-21 は間隙体積から求めた間隙比 (e^*) との関係で k をプロットしている。透水係数は間隙比の関係として表示される場合が多く、 k と e^* との間には片対数紙上で線形的関係がある。また k を w との関係でプロットすると (図-22)、周知のように、最適含水比付近で k の最小値を示す下方に凸の $k-w$ 関係となる。そこで、 w に伴う k の変化を間隙構造と対比するために、図-23 に透水試験後の間隙頻度分布を示してある。前節で記述し図-18 に図式化したように、乾燥側から最適含水比付近に移行するに従い透水係数が低下するのは、約 $1 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲から約 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 範囲へと透水性を支配する間隙の主体が小間隙領域に移行するためと考えられる (図-23 (a) と (b) 参照)。これに対して、湿潤側では頻度曲線が2つのピークを有する2モード型に変化し、約 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 範囲の間隙に加え、再び約 $1 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲に頻度の第2ピークが現われ、この範囲の間隙の出現によって透水係数の増加が計られた

ものと考えられる (図-23 (c) 参照)。このようなことから、Shridharan ら⁶⁾ は間隙頻度の50%に当たる間隙径を平均間隙径と定義し、締固め土の透水性は平均間隙径より大きな間隙部分で支配されることを報告している。

6. 結 論

(1) 本実験での締固め土の間隙構造は約 $100 \mu\text{m}$ 以下の間隙からはほぼ構成されており、約 $0.005 \mu\text{m}$ 以下 (測定不能範囲) の非常に微細な間隙の存在も累積間隙体積曲線の形状から推測できる。そのため、約 $0.005 \mu\text{m}$ 以下の間隙が主因をなし、間隙体積から算定した間隙比 (e^*) は通常的手法で求めた間隙比 (e) とはかならずしも一致せず、 e^* は e の約85%の値を示した。

(2) 締固め土の間隙構造は含水比によって大きく変化していることがわかった。乾燥側では約 $1 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲に際立ったピーク頻度を示す間隙が存在する1モードの頻度分布型を、最適含水比の状態に至るに従いそのピーク頻度の位置は約 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 範囲の小間隙領域に移行し、湿潤側では、約 $0.01 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$ 範囲に加え、再び $10 \mu\text{m} \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲に頻度の第2ピークが現われる2モードの頻度分布型を概ね示す。

(3) 間隙構造に及ぼす各試料での質量比の影響は乾燥側、最適含水比状態、湿潤側で見られる含水比の影響ほど明瞭ではない。しかし粘土あるいはローム試料に砂を混入した場合、特に、砂の混入量が非常に多く砂主体となると、前項(2)で記述した最適含水比状態でのピーク頻度や湿潤側で現われる第2のピーク頻度の位置が1~2オーダ程度大きな間隙径の方に移行し、粘土+砂試料では砂が75%、ローム+砂試料では砂が50%を境として砂の質量比の影響が間隙構造に明瞭に現われる。

(4) ローム試料を用いた締固め土の含水比に伴う飽和透水係数の変化は、乾燥側、最適含水比付近、湿潤側でそれぞれ示す間隙構造の相違と対応している。湿潤側での含水比に伴う透水係数の増加は約 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 範囲に間隙頻度の第2ピークが出現し、頻度分布曲線が2モード型に推移したためと考えられる。

参 考 文 献

1) Washburn, E.W. : Note on a method of determining the

- distribution of pore sizes in porous material, Proceeding, National Academy of Sciences, Vol.7, pp.115~116, 1921.
- 2) American Society for Testing and Materials : Standard test method for determination of pore volume and pore size distribution of soil and rock by mercury intrusion porosimeter, Designation D4404-84, Annual Book of ASTM Standards, Vol.04. 08, pp.860~867, 1985.
 - 3) Bengochea, I.G., Lovell, C.W. and Diamond, S.D. : Pore size distribution and permeability of silty clays, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No. GT7, pp.839~856, 1979.
 - 4) Ahmed, S., Lovell, C.W. and Diamond, S.D. : Pore size and strength of compacted clay, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.100, No.GT4, pp.407~425, 1974.
 - 5) Juang, C.H. and Holtz, R.D. : Fabric, pore size distribution and permeability of sandy soils, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.112, No.GT9 pp.855~868, 1986.
 - 6) Shridharan, A., Altshaeffl, A.G. and Diamond, S.D. : Pore size distribution studies, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE Vol.97, No.SM5, pp.774~787, 1971.
 - 7) Zimmie, T.F. and Almaleh, L.J. : Shrinkage of soil specimens during preparation for porosimetry tests, Soil Specimen Preparation for Laboratory Testing, STP599, ASTM, pp.202~215, 1976.
 - 8) Mckinlay, D.G. and Safiullah, A.M.M. : Pore distribution and permeability of silty clays, Journal of Geotechnical Engineering Division, Discussion, ASCE, Vol.106, No.GT10, pp.1165~1170, 1980.
 - 9) 高速道路調査会 : 関東ロームの土工, 共立出版, pp.78~91, 1973.
 - 10) Lambe, T.W. : The structure of compacted clay, Proc., ASCE, Vol.84, No.SM2, pp.1~34, 1958.
 - 11) Barden, L. and Sides, G. : Engineering Behavior and structure of compacted clay, Proc., ASCE, Vol.96, No.SM4, pp.1171~1200, 1970.
 - 12) 松尾新一郎・嘉門雅史 : 粘土の構造に関する用語について, 土と基礎, Vol.24, No.1, pp.54~64, 1976.
 - 13) Matsuo, S. and Kamon, M. : Microscope research on the consolidated samples of clayey soils, Proc. Int. Symp. Soil structure, pp.194~203, 1973.
 - 14) 松尾新一郎・嘉門雅史 : 粘性土の圧縮・膨張性における土構造の変化, 第9回土質工学研究発表会講演集, pp.81~84, 1974.
 - 15) 松尾新一郎・嘉門雅史 : 粘性土の構造における ped と pore の相関について, 第12回土質工学研究発表会講演集, pp.141~144, 1977.
 - 16) 松尾新一郎・嘉門雅史・福田宏之 : 粘性土の構造における ped の形成過程について, 第13回土質工学研究発表会講演集, pp.149~152, 1978.
 - 17) 松尾新一郎・嘉門雅史 : 土の構造と圧縮セン断特性との関連について, 第10回土質工学研究発表会講演集, pp.75~78, 1975.

(1991.5.15 受付)

PORE STRUCTURES OF COMPACTED SOILS

Hareyuki YAMAGUCHI and Hitoshi IKENAGA

In this investigation, compaction tests were firstly preformed on the soils of clay, river sand, loam and mixed samples. The mixed soils were reconstituted from the samples of clay-river sand, loam-river sand and clay-loam in various ratios of mass. After the compaction, all the compacted soils were dried in vacuum freezing condition in order to prevent the drying shrinkage, and then the measurements of pore size distributions were carried out by using the porosimetry apparatus of mercury intrusion type. Based on the results of compaction test and the measured results of pore size distribution, the pore structures of compacted soils were discussed. Moreover, permeability tests were also performed on the compacted loam samples and the consideration was made on the relationships between pore structure and permeability. It was found that the pore structures of compacted soils were influenced considerably by the values of water content and the clear difference was recognized between dry side, optimum state and wet side, respectively. It was also pointed out that the changes in permeability with water content were approximately corresponding to those in pore structure.