

粒径の違いが土の理工学性に及ぼす影響

吉 田 力

(農業造構学研究室)
(昭和59年9月1日受理)

Effect of the Grain Size on the Physical and Mechanical Properties of Soils

Chikara YOSHIDA

Laboratory of Soil Mechanics, Faculty of Agriculture, Yamagata University
(Received September 1, 1984)

I 緒 論

耕地はじめ、畦畔、堤防、土水路、農道等の対象となる表層土は、気象の変化、及び人為的な作用に伴う様々な影響を受け易い。その際、土壌は収縮、膨潤及び踏圧、積雪等の上載荷重による圧縮、耕耘による練り返し作用を受け、色々な粒径に変化し、充填されていく。その充填状態は、粒団の分布やコンシステンシー特性、または締固め荷重に左右される。そして色々な充填状態が得られることになるが、この締固められた土の状態が、耐水性、透水性、保水性、通気性、及び植物の生育に直接かかわることは明らかなことである。その意味で土の理工学性を締固めにおける粒団の挙動との関連で整理する必要がある。

従来、土の理工学性は、主にマクロ量としての密度、重量、含水比、間隙比及び土の基本的性質である粒度、比重、コンシステンシーとの関連で把握されてきた。しかし前述したごとく、土は種々なる条件によって細粒化されたり、再結合したりすることは明らかで、その程度は力学、材料、物性条件によって異なる。したがって、このような行動単位¹⁾²⁾の変化が、どのように土の理工学性にかかわるかが重要となる。そこで室内実験を通して、土の強度(貫入強度、一軸圧縮強度)、透水性、コンシステンシーなどからこの問題を検討する。

II 貫入強度

1. 締固め曲線と貫入強度

用いた供試土の物理性を Table 1 に示した。実験は風乾土で行った。突固め方法は JIS に定める呼び名 2.3 の方法³⁾により、試料はくり返し使用した。また CBR 試験で、締固め後の水浸は行っていない。実験はまず締固め曲線に沿った CBR、コーン指数(q_c)、山中硬度(q_Y)の関係を求めたため、広い範囲にわたっての貫入抵抗の測定が必要であった。そのため大きい抵抗ではオイルジャッキを、小さい場合にはブルーピングリングを用いた。 q_c はコーン先端が完全に土中に埋没した時の値を取り q_{c0} とした。なお使用したコーンの形状は先端角 30° 、断面積 6.4cm^2 である。 q_Y は同一供試土で5点測定し平均値を用いた。

Table 1. 供試土の物理性

試料	採土地点 NO.	記号	真比重 G_s	液性限界 W_L (%)	塑性限界 W_P (%)	塑性指数 I_P
山大農場	Y-S-1	●	2.69	46.3	31.1	15.2
山大農場	Y-U-1	○	2.62	50.2	35.3	14.9
幕の内	M-S-3	×	2.58	49.5	33.3	16.2
幕の内	M-U-1	⊙	2.60	63.3	36.6	26.7
面の山	O-S-2	□	2.53	80.5	46.3	34.2
月山	G-U-1	▲	2.77	65.3	44.0	21.3

Fig. 1 に各供試土の締固め曲線を示す。締固め曲線に沿う乾燥密度 (ρ_d) と CBR の関係については、Fig. 2 に示す。締固め曲線でゼロ空気間隙曲線に沿う部分 (以下、飽和系と呼ぶ) では、 $\log CBR - \rho_d$ の関係は近似的には直線関係が認められる。 $\rho_d - q_{co}$, q_Y についても同様なことが認められる (Fig. 3 参照)。締固め曲線に沿って、CBR 等強度特性を求める場合、通常の 5~6 点という測点では最適含水比付近で ρ_d の変化はさほどではないが、強度が急激に大きくなることがしばしばみられる。この問題を検討するため M-S-3 の試料を用い、測点数を増やして実験を行った。Fig. 2 で × 印である。高含水比側から 8 番目の点までは指数関係が認められるが、9 番目の点で CBR は急激に大きくなる。8 番目の点の ρ_d , 含水比 (w) は、 $1.42g/cm^3$, 28.5% であり、9 番目の点では、 $1.43g/cm^3$, 28.0

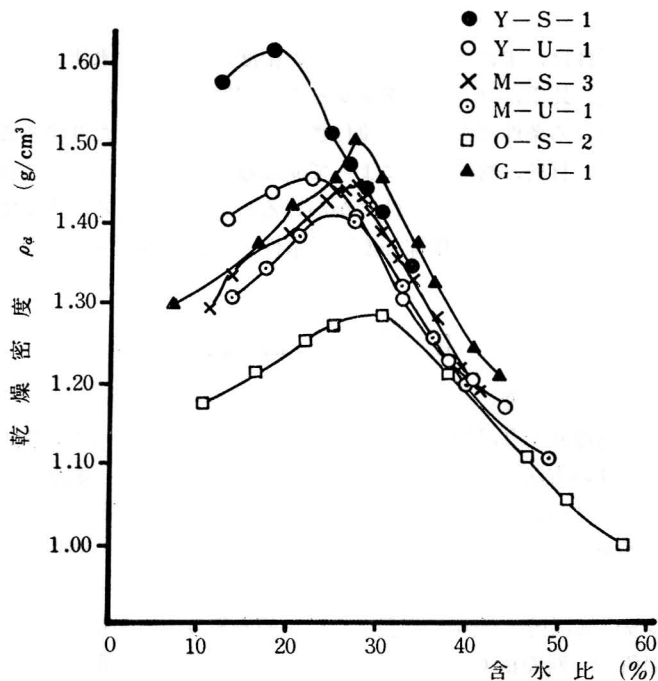


Fig. 1. 供試土の締固め特性

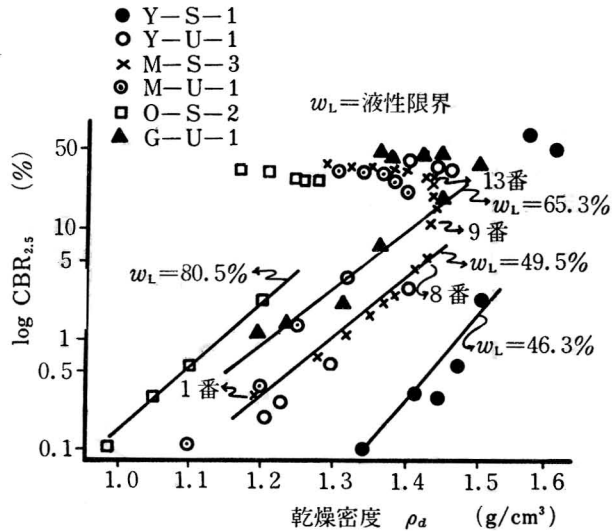


Fig. 2. 乾燥密度と $CBR_{2.5}$ の関係

%であった。両者の差はきわめて小さいが、 CBR は4.7%から10.9%へと飛躍的に大きくなる(これを第Ⅰ段階を呼ぶことにする)。その後の測点では ρ_d の変化は1.43~1.40とそれほど大きくはないが、 CBR は29.0%と急に大きくなる領域がみられる(同様に第Ⅱ段階とよぶ)。図中で×印、9~13番目の範囲である。さらに低水分側では、 ρ_d , w が低下しても CBR は一定値に近づく(第Ⅲ段階)。

以上のように締固め土では強度との関連で、締固め曲線に沿っての明らかに異なる三つの領域が存在する。第Ⅰ段階は、行動単位は十分な練り返しを受け細粒化が進行している⁴⁾一方、供試体は飽和状態に近いと考えると、貫入体の進行に伴っての行動単位の移動に直接かかわるものは単に水分状態(水膜厚さ)とみなし得よう。したがってこの領域では貫入量—荷重強さの関係は直線的となったり、 pF と良い対応を示すことになる。

2. コンシステンシー特性と貫入強度

Fig. 2によると液性限界の小さいY-S-1が図上で右側に、大きなO-S-2が左側に位置している。即ち多少のばらつきはみられるが、液性限界の小さな順に右から左へと移行していく。飽和系における貫入特性はコンシステンシー特性と関連が深い。

3. 貫入体形状の違いの持つ意味

Fig. 3に q_{co} , q_x , CBR と ρ_d の関係を示す。前述の第Ⅱ段階の存在は、 CBR 試験で最も顕著であり、つづいて q_{co} で、 q_x ではさほど明らかではない。今それぞれの貫入挙動について考えるとき、その大きな違いは貫入体の形状であり、いま一つは貫入速度が問題となる。 CBR の貫入体は円柱で断面積が 19.625 cm^2 で、底面は平面である。 q_{co} と q_x は三角錐であり、貫入断面は一般には両者で異なる。また貫入速度は CBR で 1 mm/min , q_{co} では 600 mm/min , q_x はほとんど瞬間的と考えられるが、いま貫入体(全長 4 cm) が全て土中に侵入したとし、それに要した時間を1秒とすると 2400 mm/min ということになる。

試料 M-S-3

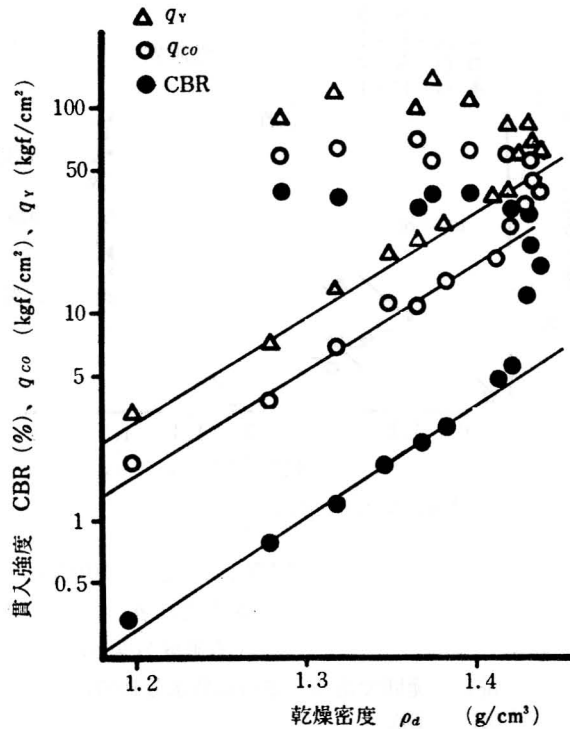


Fig. 3. 乾燥密度と各種貫入抵抗の関係

このような条件の違いを考慮すると、三者の貫入挙動については次のように解釈できよう。CBRでは円柱が不飽和状態の土に貫入される時、貫入体の接触面下部では土が圧縮され、新たな ρ_d の大きな部分が出現し、そこでは降伏値も高まるものと考えられる。したがって飽和系から不飽和系へ移る段階で CBR の急激な変化が現われるのであろう。その際貫入体の進入速度に応じて行動単位は、間隙を埋めるべく移動したり、細粒化されなければならないので、ある程度の粘性（流動性）を持つ必要があり、行動単位も小さなものでなければならない。

次に q_v は一般に貫入深さも浅く、貫入速度もきわめて速い。このような場合、土の持つ緩和特性とも関連するが、貫入体の周囲を圧縮することにより新たな ρ_d の高い状態を作り出すことは、CBR、 q_{co} の場合より著しく少ないものと考えられよう。したがって第Ⅱ段階はそれほど明瞭なものとはならない。

q_{co} の貫入挙動は CBR、 q_v の中間型といえよう。また飽和系における貫入挙動の基本は三者とも塑性流動であろう。飽和系で、測点数は少ないが対数回帰分析を行うと、

$$\log \text{CBR}_{2.5} = -7.12 + 5.43\rho_d \quad (1)$$

(n=8, r=0.99)

$$\log q_{co} = -5.52 + 4.76\rho_d \quad (2)$$

(n=7, r=0.99)

$$\log q_Y = -5.24 + 4.76\rho_d \quad (3)$$

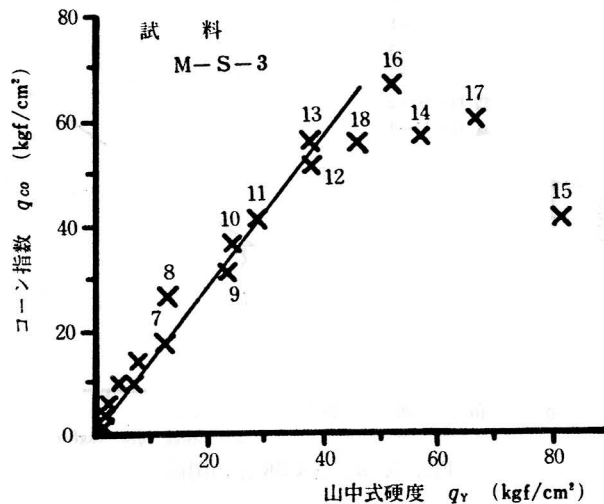
$$(n=8, r=1)$$

n: 個数, r: 相関係数

となる。三者ともほぼ同じ勾配であり、特に貫入体形状が相似である q_{co} と q_Y は全く同じであった。

4. CBR, コーン指数, 山中硬度の相関

第I段階では各貫入抵抗値の間に相関が認められることは明らかであるが、実用化にあたってはさらに不飽和系への展望が望まれる。ここで用いた三種の貫入試験は、不飽和系で基本的には貫入挙動を異にするが、土のある定った状態の強度を反映しているとすれば、三者の間には相関があることは予想される。Fig. 4に q_{co} と q_Y の関係を示した。図



注：図中の数字は締固め曲線に沿っての湿潤側からの測点番号

Fig. 4. q_Y と q_{co} の関係

中の数字は、締固め曲線に沿う湿潤側からの測点順であるが、第I段階 (1~8), 第II段階 (9~13) と考えられ、この範囲では q_Y の増大に伴って q_{co} も大きくなり、ほぼ直線的な関係が両者の間に認められる。それ以後の測定ではばらつきも大きく、含水比の低下に伴っての貫入抵抗の増加という規則性は認められなくなる (第III段階)。ここでは図上での測点の混雑を考慮して、M-S-3土だけ示したが、全試料についても同じ結果が得られる。第III段階での測点のばらつきは、試料が低水分状態になり硬くなってくると、山中式硬度計の土中への貫入部体積も小さくなり、しかも含水比、密度の部分的な不均一さ、また行動単位の高さも不ぞろいであるので、このような結果が得られたものと考えられる。全試料で第I, 第II段階について直線回帰分析を行うと、

$$q_{co} = -2.06 + 0.78q_Y \quad (4)$$

$$(n=51, r=0.95)$$

となり、非常に有意な相関がみられる。 q_{co} と q_Y の関係については既に検討がなされている⁵⁾が、ここで得られた関係とは実験条件も異なるので各定数も若干異なるようである。以前より各種強度定数間の関連についての検討は活発に行われ、また土壌の状態量と強度の関係も検討されてきている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。一方貫入体に関する二次元的⁹⁾¹⁰⁾、三次元的解析¹¹⁾についての理論的追求もなされている。しかしここでは CBR を簡単な貫入試験で推定することをも考慮して、まず締固め状態とそれぞれの貫入抵抗の関連を検討し、その適用限界についても明らかにする。CBR と q_{co} 、 q_Y の関係を第 I、第 II 段階について、Fig. 5、Fig. 6 に示した。

第 I、第 II 段階でそれぞれ近似的には一次式が認められるが、勾配は異なる。第 III 段階ではこれらの関係のばらつきは大きく一定の傾向は得られなかった。そこでこの関係につ

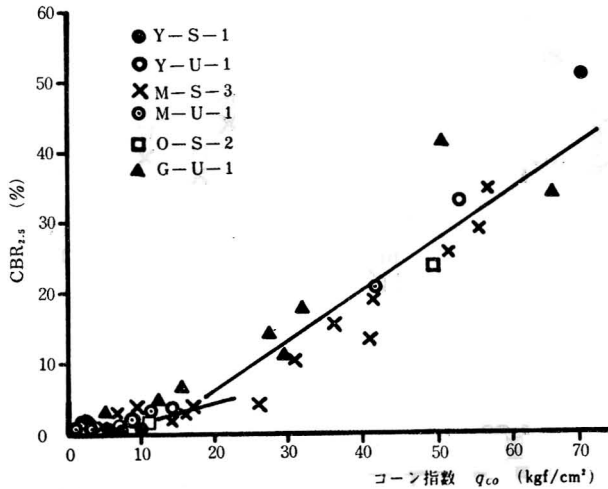


Fig. 5. q_{co} と $CBR_{2.5}$ の関係

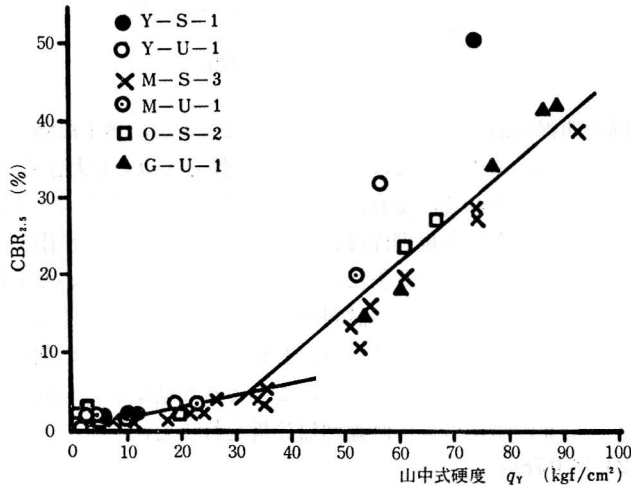


Fig. 6. q_Y と $CBR_{2.5}$ の関係

いて直線回帰分析を行うと次のようになる.

$$\text{第 I 段階} \quad \text{CBR}_{2.5} = -0.16 + 0.24q_{co} \quad (5)$$

(n=34, r=0.91)

$$\text{CBR}_{2.5} = -0.47 + 0.18q_Y \quad (6)$$

(n=34, r=0.94)

$$\text{第 II 段階} \quad \text{CBR}_{2.5} = -8.09 + 0.71q_{co} \quad (7)$$

(n=17, r=0.91)

$$\text{CBR}_{2.5} = -9.7 + 0.54q_Y \quad (8)$$

(n=17, r=0.77)

n: 個数, r: 相関係数

なおここでは第 I 段階は CBR 7% 以下, 飽和度 90% 以上を目安とした. また第 II 段階は ρ_a -貫入強度の関係で, $\text{CBR}_{2.5}$ が一定値に近づく点としたが, 飽和度は 70%~90% の間であった. しかし飽和度には多少のばらつきはある.

以上の結果によると, 各貫入抵抗の関係には土壌の種類による違いからくる差もみられず, q_{co} , q_Y による CBR の推定は第 II 段階までは可能であろう. その精度についてはさらにデータの集積が必要となろう.

5. pF 値との対応

CBR, q_{co} , q_Y と pF の関係を Fig. 7 に示した. pF と強度定数との間の指数関係の存在は良く知られている⁵⁾⁶⁾が, $\text{CBR}_{2.5}$, q_{co} , q_Y の間にも多少のばらつきはあるが, 第 I 段階については同様な結果が得られる. 第 I 段階における CBR の荷重強さ—貫入量曲線の直線性, 及び貫入抵抗と pF の対応から, この領域では行動単位は細粒化され, また微細粒団の移動に十分な水分を有し, 主として土-水系の流動特性に支配される部分と考えられる. 第 III 段階は行動単位の細粒化及びこれに伴う粒径の均一化も顕著ではなく, 低水分領域であるので, 貫入体の土中への進入に伴う行動単位の挙動は, 粒団自体の降伏及び粒子間の結合状態の破断によってのみ移動することになる. 行動単位の移動の形式は主に摩擦によるものと考えられる. 第 II 段階は, 第 I, 第 III 段階の中間と見ることができよう.

III 一軸圧縮強度 (q_u)

1. q_u に及ぼす粒径の影響

Fig. 8 に 4 段階に粒径をふるいに分けた試料による一軸圧縮試験の結果を示した.

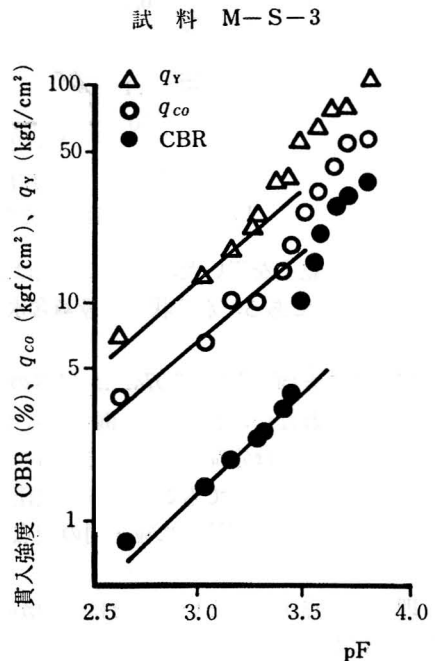


Fig. 7. pF と各種貫入抵抗の関係

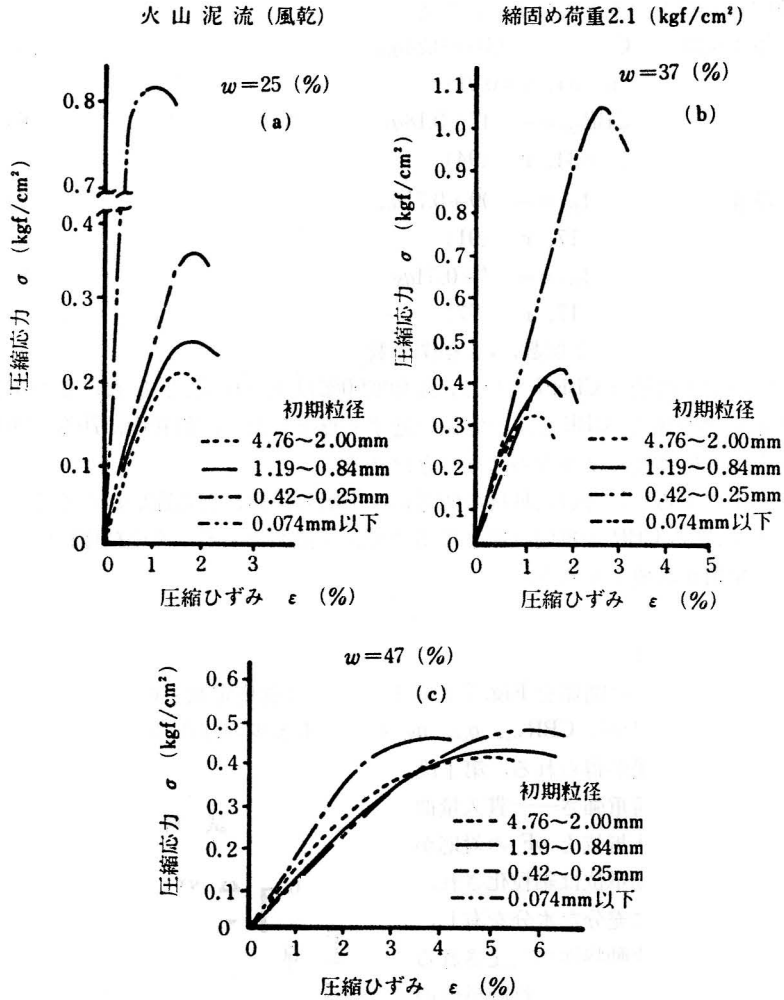


Fig. 8. 初期粒径を違えた試料での一軸圧縮強度 (締固め土)

試料には風乾土を用いた。締固め方法は三層に分けた静的締固めである。締固め荷重は、 2.1 kgf/cm^2 である。水分状態は最適含水比($w_{opt} \doteq 37\%$)を境に飽和系、不飽和系のものについて行った。

図によると(a), (b)で 0.074 mm 以下の試料での q_u が著しく大きい。(c)ではその差はほとんど見られない。また(a)に例を取って考えると、 q_u は粒径の小さい順に大きくなっている。この実験は定荷重締固めであるので、粒径別供試体の ρ_d は若干ではあるが異なることになるが、それでもこのように粒径に対応した q_u が得られる。この理由は次のように考えられる。まず第一に粒子間の接点の多少の問題である。次に行動単位の大さきの不均一さの影響が考えられる。

即ち、接点が多いということは応力が分散され、単位面積当りの応力は小さくなるということになる。不均一さの問題については、供試体中にさまざまな大きさの行動単位が存在する場合、応力の伝達のされ方も不規則になり、応力の集中が起り易くなる。この場合

には q_u は小さな値を示すであろう。これらの二つの原因の相乗効果により初期粒径の小さな試料での q_u が大きくなったものと考えられる。

Fig. 9 には ρ_d を一定にした試料での一軸圧縮試験の結果を示した。Fig. 8 と同様な結果が得られた。

2. 粒子破碎と一軸圧縮強度

Fig. 8 の (b), (c) を比較すると, (c) では粒径の差はほとんど見られない。また 0.074 mm 以下の試料を除く他の試料での q_u は (b) と同じか、むしろ強くなるという傾向が得られた。(c) では $w=47\%$ であり、飽和系であるので粒団の降伏値の低下も著しく、締固め操作によって粒径が細粒化された結果と考えられる。即ち、圧縮荷重に抗する行動単位は、ほぼ均一化しているものと理解される。

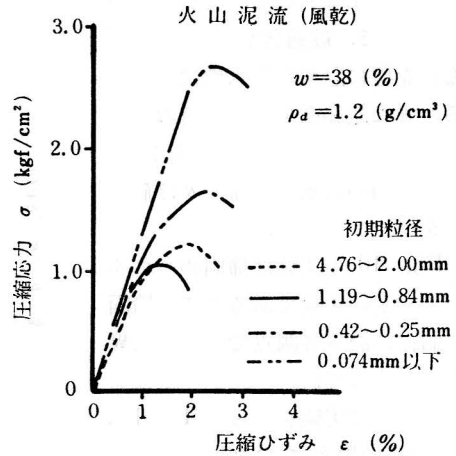


Fig. 9. 粒径別試料での一軸圧縮強度 (w, ρ_d 一定)

IV 透 水 性

1. 初期粒団径の違いが透水性に及ぼす影響

締固めに伴う行動単位の変化が透水性、通気性に与える影響は当然予想されることであるが、実際にどの大きさの行動単位が、どの程度透水性にかかわるかということをはっきりとすることは、容易なことではない。透水に関与する行動単位をいかにして取り出すかといった問題は、実験的、理論的にも困難なことである。そこであらかじめ粒径を調整した試料による締固め土の透水試験から、行動単位と透水性の関連を検討する。

Fig. 10 は締固め荷重一定 (衝撃荷重使用)、全断面締固めの場合である。ここにいう全断面締固めとは、締固めモールド径に等しい載荷板を介して締固めを行うことを意味する。透水試験は毛管飽和させた試料で行い、変水位法による。図によると、0.074mm 以下の試料と、他の三者では明らかに透

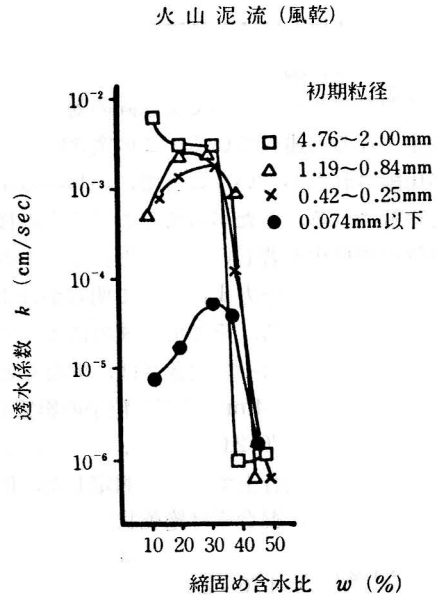


Fig. 10. 初期粒径の違いと透水係数の変化 (条件: 締固め土, 仕事量 $5.5 \times 10^4 \text{ cm} \cdot \text{kg/cm}^3$)

水係数 (k) は異なる。それぞれの供試土で、最適含水比 ($w_{opt}=37\%$) を境に急激に透水性は低下する。また飽和系での各試料の k の差は、不飽和系ほど大きくはない。締固め含水比30%で k は最大値を示す。

Fig. 10 の実験は締固めエネルギー一定の実験であるので、締固め曲線に沿う各測点での ρ_d は異なる。そこで次に ρ_d を一定にした供試体で実験を行った (Fig. 11)。 ρ_d 一定の場合では初期粒径の影響は明らかである。

また Fig. 10, 11 で w_{opt} よりやや乾燥側で k が最大という現象がみられた。これは締固め過程での注水によるスレーキングの影響と考えられる。即ちスレーキングに

より細粒化した行動単位は、注水時の攪拌により再粒団化され、大粒団として行動するため大孔隙ができ、 k の増大につながったものと考えられる。

2. 締固めにおける粒子破碎と透水係数の変化

相馬ら¹²⁾は、締固めと透水性の関係を突き固め効果という指標を用いて説明している。そして湿潤過程の締固めで突き固め効果が最大となる点は、クロボク土の場合、透水係数が最小となると述べている。この突き固め効果ということは、突き固めによってどれだけ土が圧縮されたかということで、いわゆる圧縮歪が大きなものの方が突き固め効果が大きいものと理解される。したがってそこでは土の移動量が大きく、練り返しの程度も激しく、行動単位の細粒化も著しいと考えられる。このような細粒化も、 k が最小となった理由の一つと考えられる。一方 Fig. 10 で明らかなように 0.074mm 以下の粒径が透水性に与える影響は明らかである。そこで締固めによって行動単位は細粒化されるにしても、透水性に著しく関与するにはその大きさは、少なくとも 0.074mm 以下のものでなければならないと考えられる。0.074mm 以下の粒子の影響をさらに検討すべく、次のような実験を行った。あらかじめ 4.76~2.00mm と、0.074mm 以下にふるい分けた試料 (風乾) を混合率を変え混ぜ合わせた混合土で、 k を測定した。供試体の作成は、仕事量を一定 ($5.6 \times 10^4 \text{ mkgf/m}^3$) で締固めた。混合率は絶乾状態で

$$P(\%) = \left(\frac{4.76 \sim 2.00 \text{ の試料重量}}{4.76 \sim 2.00 \text{ の試料重量} + 0.074 \text{ mm 以下の試料重量}} \right) \times 100$$

P: 混合率(%)

とした。結果を Fig. 12 に示した。また Fig. 13 は、Fig. 12 の各測点での充填状態であ

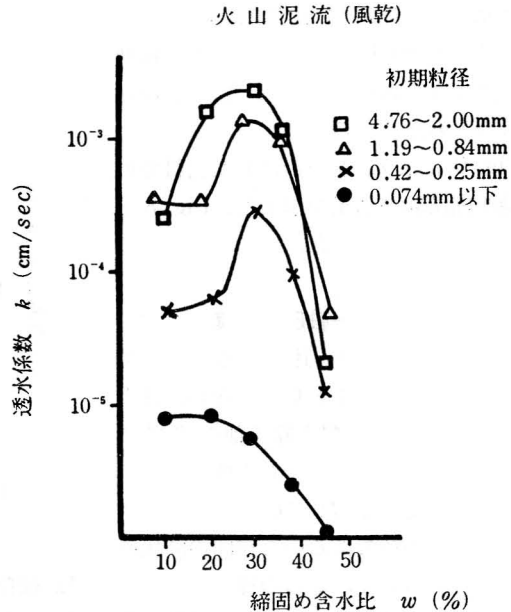


Fig. 11. 初期粒径の違いと透水係数の変化
(条件: 締固め土, 乾燥密度一定
= 1.1 g/cm^3)

る。

Fig. 12 から混合率60%を境に k は著しく大きくなっている。また含水比45%の試料の k は 10^{-7} のオーダーであり、変水位法での測定には問題もあろうが、参考のため記載した。前述したことであるが45%の水分状態は飽和系の締固めであるので行動単位の細粒化が著しく k もそれに伴って小さくなったものと考えられる。Fig. 13 では、混合率が増加するにしたがって ρ_d も増大するが、 $P=60\%$ からは減少する。このような混合土で $\rho_{d \max}$

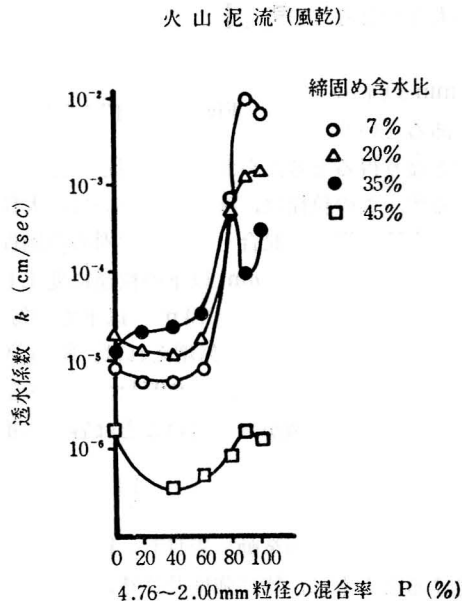


Fig. 12. 4.76~2.00mm 土と 0.074mm 土の混合割合の違いから見た透水係数の変化

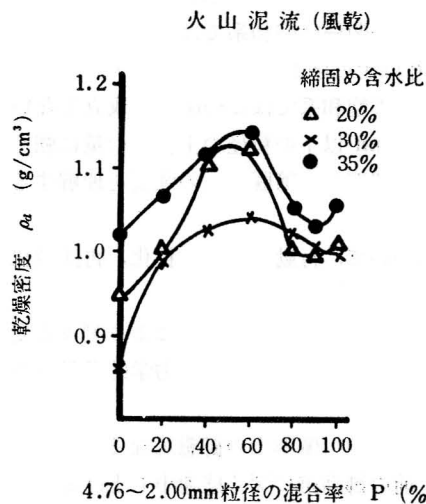


Fig. 13. 4.76~2.00mm 土と 0.074mm 土の混合土の締固め特性

を得るには 0.074 mm 以下の粒径が 40% あれば良いということになる。 k の値も 0.074 mm 以下の含有量が 40% 以上で急激に小さくなる。

以上のことから 0.074 mm 以下の粒径の含有量が 40% を越えると、 ρ_d の増加よりはむしろ細粒土の量が土の透水性に与える影響が大きいと考えられる。

そこで混合土の 0.074 mm 以下の土の含有量が 40% 以上であるという

ことが一つの工学的指標となり得ると考えられるが、実際には、30 μm 以下の行動単位の量に置き換えて考えられる¹³⁾。この粒径は、締固めにおいて、大粒団の移動にかかわる粒径と考えられる。ここで、実験に用いた混合土では、締固めの過程で、4.76~2.00 mm の粒径の一部は細粒化され、その一部は 30 μm 以下の粒径に変化していることが考えられる。したがって、30 μm 以下の粒径の量は、0.074 mm 以下で 80% 含まれるとすると、細粒化によって 0.074 mm 以下の粒径がおおよそ 20% 増えれば、結局 30 μm 以下の粒径の含有量は全体の 40% ということになる。Fig. 14 には 0.074 mm 以下と 4.76~2.00 mm の試料の締固め後の粒径加積曲線を示した。図から前述のことは容易に推察される。

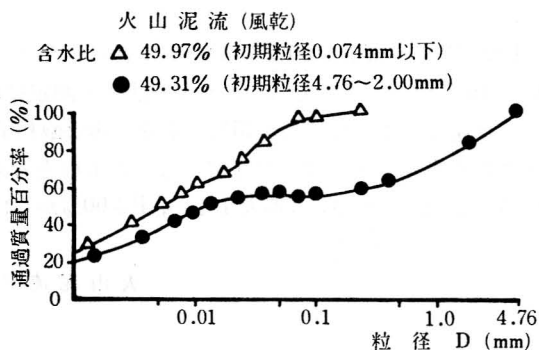


Fig. 14. 締固め土の粒径分布 (粒径別試料)

V 摘 要

本研究は、締固めにおける行動単位の挙動に着目し、締固め土の理工学性における行動単位の果たす役割を検討するとともに、特に強度及び透水性と行動単位の関連を中心に明らかにしたものである。

その結果を要約すると次のようになる。

- 1) 締固め土の強度には、締固め曲線に対応して 3 段階の特徴のある領域が存在する。
- 2) 締固め土の強度と pF の関係は飽和系では

$$\log q = a + b pF \quad (q \text{ は土の強さ, } a, b \text{ は定数})$$

という関係が認められるが、不飽和系ではこの関係は成立しない。

3) 一軸圧縮強さは 0.074 mm 以下の粒径の土粒子の量に強く影響される。したがって締固めによる粒子破碎の量的把握が、締固め土の強度を理解するには重要であることを指摘した。

4) 締固め土の透水性について、行動単位の細粒化、再団粒化の観点からその特徴を説明した。

以上であるが、行動単位は時間、外力、温度等により刻々と変化するので、その大きさを直接見ることは不可能に近い。ここでは種々の力学的挙動から、行動単位の挙動を理解しようと試みた。

本研究は、東京大学教授故竹中 肇博士の御懇篤なる御指導のもとに行われたものの一部である。ここに謹んで生前の御高誼に深く感謝申し上げる次第である。さらにまた、山形大学教授東山 勇博士からも適切な御助言をいただいたことを付記し、謝意を表す次

第である。

参 考 文 献

- 1) 東山 勇・喜田大三・大平至徳；土質工学におけるレオロジー，土と基礎，27-11， pp.75-82，1980.
- 2) 足立忠司・堤 聡・竹中 肇・南斉好伸；突固めに伴うクロボク土の団粒挙動と充填特性，農土論集，103， pp.68-73，1983.
- 3) 土質工学会編；土質試験法， pp.278-284，1979.
- 4) 東山 勇；atterberg Limits の工学的意義，土壤の物理性，30， pp.23-28，1974.
- 5) 新垣雅裕；コーン貫入抵抗による粘性土壤の理工学的性質，三重大学学術報告，(農)，44， pp.248-267，1972.
- 6) 須藤清次・東山 勇・山崎不二夫；固い土の力学的性質—土のレオロジー的構造—，農土論集，14， pp.21-26，1965.
- 7) 吉田 力；土壤の粘弾性挙動，土壤の物理性，No.24， pp.17-20，1971.
- 8) 足立忠司・竹中 肇；ヒズミ速度効果ならびに土壤水分から見た粘性土の工学的挙動，農土論集，43， pp.26-32，1973.
- 9) 前出，5) p.132.
- 10) 藤川武信・高山昌照・甲本達也；地面へのコーン貫入に関する二次元的解析，農土論集，73， pp.62-68，1978.
- 11) 藤川武信・甲本達也；地面へのコーン貫入に関する三次元的解析，農土論集，74， pp.59-66，1978.
- 12) 相馬尅之・前田 隆・山田耕土；クロボク土の突固め効果と透水性の関係，農土論集，103， pp.62-67，1983.
- 13) 吉田 力・東山 勇；締固めにおける行動単位の挙動とその特性，農土学会東北支部講演要旨，第31回， pp.184-185，1983.

Summary

The effects of the kinetic unit on the physical-engineering properties of the compacted soils are studied based on the point of behavior on the kinetic unit concerned with the compaction of soil. The results are summarized as follows ;

1) On the relation between strength and compacted state of soil, it becomes apparent that there are three characteristic stages along the compaction curve.

2) As to the saturated region of compaction curve, the relationship between the strength of soil and the value of pF is as follows.

$$\log q = a + b \cdot pF$$

where

q = strength of soil

a, b = constant

But, this relation can not be applied to the unsaturated region.

3) It becomes apparent that the unconfined compression strength is mainly influenced by the grain size of aggregate which is less than 0.074mm. Therefore in order to understand the characteristics of strength on the compacted soil, it

may be important to estimate amount of the crushed aggregates by compaction. ④

4) Relationship between the permeability of compacted soil and the behavior of the kinetic unit for the compaction is explained here, that is, it is presumed that the grain size of aggregate which mainly influences on the permeability of compacted soil is less than 0.03 mm.