

土の締固めによる密度増加と締固め土の構造に関する研究

柴田英明*

Study on the Mechanism of Densification by Compaction
and the Structures of Compacted Soils

By Hideaki Shibata

Synopsis: The densification by compaction changes owing to the difference of soil, liquid, compaction energy and methods of compaction, so the form of compaction curve is complicated. In this paper, I made experiments on several soils by impact and static compaction test for the purpose of explication of the mechanism of densification by compaction, and made clear the principal factors influencing the densification by compaction from the shape of compaction curve that is the result of experiment. Moreover I considered on the structures of compacted soil from another angle in order to clear the mechanism of densification, consequently inferred the existence of two essential structures of compacted soil.

要旨： 土の締固めによる密度増加は、土質・液分・締固めエネルギー・締固め方法等により変化し、その締固め曲線の形状は複雑なものである。

本報は、土の締固めによる密度増加の機構を解明するため、数種類の土について動的及び静的締固め試験を行ない、締固め曲線の形状を分析して、主な密度増加を支配する要因を明らかにした。さらに、締固められた土の構造について考察し、2種の基本的構造の存在を推論したものである。

1. まえがき

土の締固めは、非常に古くから経験的に行なわれてきた土質安定施工法の一つであり、特に、盛土やアースダム等土構造物の築造には、最も実用的でかつ経済的な施工方法である。1933年、R. R. Proctor¹⁾（米国）によって土の締固め理論が展開されて以来、Hogentogler (1936), Hilf (1956), Lambe²⁾ (1960), Olson³⁾ (1963), Seed⁴⁾ (1960) 等により締固めに関する種々の研究が数多く行なわれてきた。これらの研究では、毛管現象と潤滑及び水和作用、間隙圧の増減、界面化学理論、有効応力理論等により粘性土の締固めについての解釈が試みられた。しかし、締固めによる上の密度増加の主たるメカニズムは、土質・液分・締固めエネルギー・締固め方法等により異なり、その締固め曲線の形状は複雑なものであり、既製の理論を用いて締固め曲線全般に渡ってその締固め機構を説明することは困難なことである。そこで、本研究では考えられる幾つかの締固め要因の役割を基礎として、締固めによる密度増加のメカニズムを、主として締固め曲線の形状より推進し、さらに締固め土の構造

からの考察を加えて、より一般的締固め理論を導き出すことを目的としたものである。

2. 試料、液分及び実験方法

締固めは2層とし、締固め方法は動的突固め・静的締固めの2種類を用いた。動的突固めは直径7.5 cm 高さ15 cm のモールドと重量1.5 kg 落下高25 cm のランマーを用い、単位体積当たりの締固めエネルギーは JIS A 1210 にほぼ合せてある。静的締固めは動的突固めの場合のモールドと同一のものを使用し、最大載荷荷重を35 kg/cm² 載荷速度を1 mm/minとした。

表1 試 料

試 料	G _s	備 考
豊浦標準砂	2.64	平均粒径 0.18 mm U _c =1.46
相馬石英砂	2.64	平均粒径 0.7 mm U _c =4.89
碎 石	2.70	平均粒径 3.05 mm
ガラスビーズ	2.51	平均粒径 2.60 mm
木 節 粘 土	2.67	LL=42.6 PL=17.2 I _p =25.4
カオリン	2.67	LL=56.3 PL=14.6 I _p =41.7

使用した液分は水とケロシンの2種類とした。この液分は比重が同一でないので、含水比のような単なる重量比を用いて各液分による締固め曲線を描くことは、比較

* 土木工学科 助手
Assistant, Dept of Civil Engineering.

上不便であるうえ、ゼロ空気間ゲキ曲線が一本にならないので繁雑になる。このため、次に述べるような含水比を用いてすべて比重1の水の場合に換算した。

$$w' = \frac{W_L}{W_s \cdot G_L} \times 100 \quad (\%)$$

ここで w' : 含水比 (%)

W_L : 土中の液分の重量 (g)

W_s : 土粒子の重量 (g)

G_L : 液分の比重

使用した試料は、表-1に示す土である。

3. 締固め曲線の形状と土の締固め機構⁵⁾

3.1. 締固めエネルギーの低い場合について⁶⁾

締固め回数 (N) が0.03~5回程度の極めて低い締固めエネルギーの場合、液分として水或いはケロシンのどちらを用いても、また土質の如何にかかわらず、締固め曲線の形状は含水比の増加とともに下降線を示し、含水比がかなり大きくなってから上昇傾向に転ずるようになる。(図-1参照) これは、液分として水を用いた場合、含水

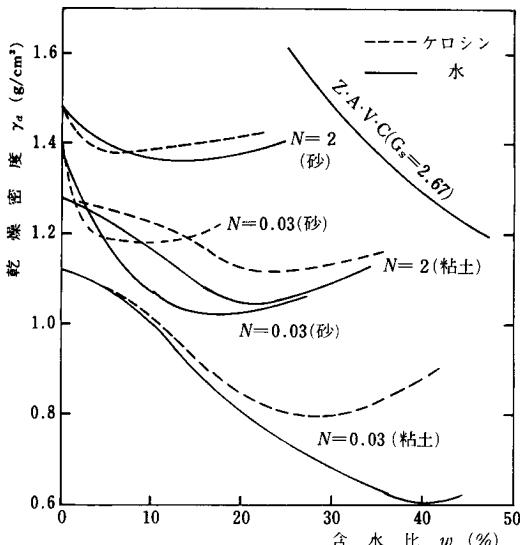


図1 低エネルギーの場合の締固め曲線

比がゼロより漸次増加してくると、土粒子間にメニスカスが多数形成されるため、毛管圧力が大きくなり、見掛けの粘着力は増加し、一方、内部マサツ角は飽和度が低いために下がらないので、液分の増加により粒子間のせん断抵抗は増加し、締固めによる密度増加を妨げるようになる。さらに含水比が増すと、今度はメニスカスが徐々に消滅して、毛管圧力は減少するようになる。このため、粒子間のせん断抵抗は減少し、土粒子は動き易くなつて、乾燥密度は増加することになる。

次に液分としてケロシンを用いた場合、締固め曲線の形状は全般に谷が浅くてフラットであり、同一の締固めエネルギー下での水を用いたときよりも、かなりの含水比の範囲まで上方にあり、乾燥密度としては比較的高くなっている。(図-1参照) これは、液の性質上、ケロシンは水に比べて親和性⁷⁾が小さいのでメニスカスができにくく、毛管圧力が小さくなるため、粒子間のせん断抵抗が水を用いたときに比べて大きくならないためである。

このように、低エネルギー下に於ける土の締固め機構は、土質や液分の如何にかかわらず、粒子間のせん断抵抗の大きさに支配されると考えることができる。

3.2. 標準的な締固めエネルギー下に於ける粘性土の締固め機構

粘性土に於いては、JIS A 1210に規定されている程度の締固めエネルギーをうけると、締固め曲線の形状は、含水比の少ない部分では少し凹みがあるが、ほぼOMC(最適含水比)をもつ上に凸な形状を示している。(図-2)

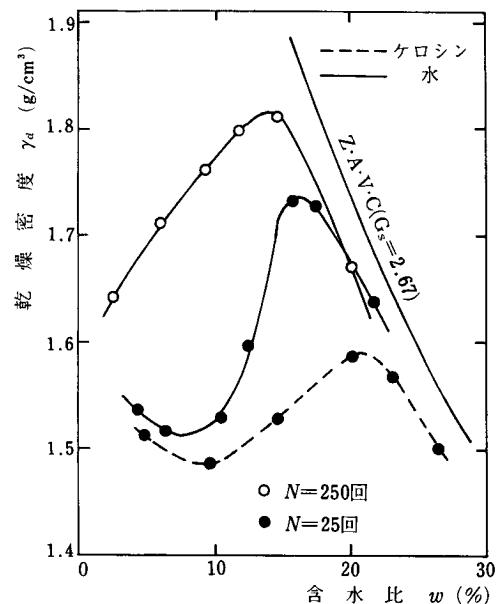


図2 粘性土の締固め曲線

参照) これは、前節の低エネルギーの場合の締固め曲線の形状とは逆の形状を示している。そこで、粒子間のせん断抵抗の影響をチェックするため、粒子間のせん断抵抗の大きさがほぼ明らかな静的締固め試験を行ない、その締固めた供試体を使って三軸試験を行ない、図-3に示す C_u , ϕ_u を得た。

この実験結果から静的締固め試験に於ける締固め機構について考察すると、含水比の小さい箇所では粒子間のせん断抵抗がやや大きくなるにもかかわらず、乾燥密度

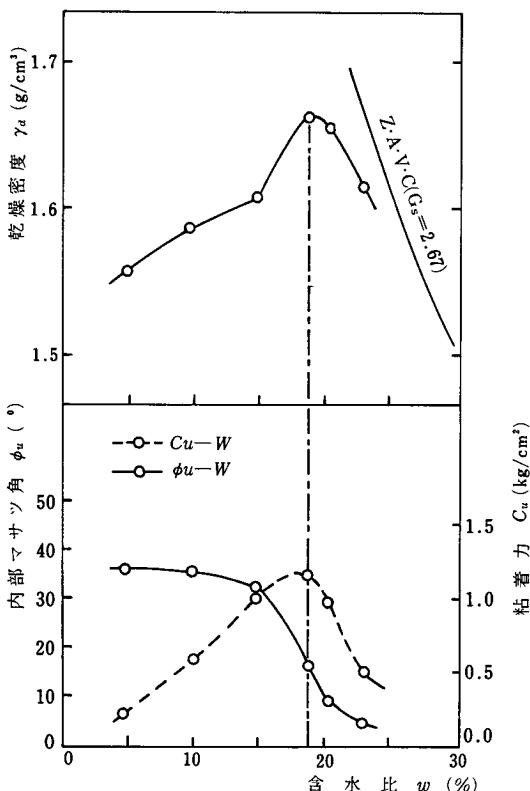


図3 カオリン粘土の静的締固め試験と三軸圧縮試験

が増加することになる。これは、締固めによる密度変化が、前節で述べた粒子間のセン断抵抗の影響以上に、土粒子の配列構造²⁾の変化が支配的原因であると考えられる。即ち、含水量が増すにつれて粘土粒子の電気的反発力(注)が大きくなり、ある程度の締固めエネルギーのもとでは、粘土粒子の配列構造がLooseな綿毛構造からより密な分散構造へと移行し易くなるため、粒子間のセン断抵抗の増大による影響以上に粘土粒子は動き易くなり、締固めによる乾燥密度は増加していく。さらに含水比が増し、OMC付近まで近づくと、メニスカスの消滅に伴ない粒子間のセン断抵抗も減少し始め、粘土粒子の配列構造の変化と相まって密度は増加する。含水比がOMCを越えると、土粒子間の間ゲキ内の水量が増して物理的に粒子間隔が離れるを得ないため、乾燥密度はゼロ空気間ゲキ曲線に沿って下降していくことになる。

液分にケロシンを用いた場合、粘土粒子のまわりの交換性陽イオンが拡散せず、粒子表面に付着したままであるので、粒子間の電気的反発力(注)は生じず、水を用いたときのように液分が増加しても、粘土粒子の配列構造は分散構造になりにくい。このため、粒子配列構造の変化が少なく、乾燥密度は全般的にそれ程大きくならず、締

固め曲線の形状はフラットな凸型状となっている。

液分の少ない箇所で、水やケロシンのどちらを用いた場合でも、締固め曲線が少し凹型状になっているが、この程度の少ない液分の量のところでは、粒子配列構造がまだ綿毛構造で、殆んど変化がないうえ、むしろ粒子間のセン断抵抗が大きくなり、この影響をうけているためと考えられる。

このような締固め状態からみて、粘性土に於ける標準エネルギー下での締固め機構は、主に粘土粒子の配列構造の変化によるものの方が大きく、粒子間のセン断抵抗の大きさによる支配力は小さくなると考えられる。

(注)

ここで電気的反発力とは、粘土粒子が乾燥している場合には、図-4-Aに示すように、粘土粒子のまわりには交換性陽イオンがあり、粘土全体的には正負電荷が釣合って無帶電状態である。このときの粘土粒子の配列構造は、間ゲキの多いランダムな状態である綿毛構造になる。一方、湿潤状態に於いては、図-4-Bに示すように、粘土粒子のまわりには吸着水(+)が付着し、その外側の毛管水中に陽イオンが分散していくので、粘土粒子はマイナス帯電となり、粘土粒子間では互いに電気的斥力が生じることになり、粘土粒子の配列構造が並列的になる分散構造へと移っていくことになる。この分散構造は構造上間ゲキが少なく密度が大きい。

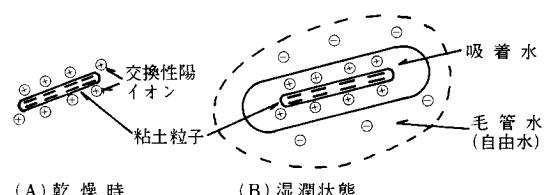


図4 粘土粒子の帶電状態

3.3. 大きな締固めエネルギー下に於ける粘性土の締固め機構

特に大きな締固めエネルギーとして、粘性土を締固め回数N=250回で突き固めたときの締固め曲線の形状は、図-2に示すように含水比の少ないところでも凹型状をなさず、含水比の増加とともにスムーズな凸型状のcurveを示している。これは、高エネルギー下での締固めによる密度増加は、粒子間のセン断抵抗の影響がますます小さくなり、粘土粒子の配列構造の変化によって殆んど支配されることになったことを示すものと考えられる。即ち、含水比の増加に伴ない、大きな締固めエネルギーをうけることにより、粘土粒子の配列構造が粒子間のセン

断抵抗の影響を乗り越えて、より密度の高い構造へと移行していくことになり密度増加が起きると考えられる。

3.4. 標準的な大きさ以上の締固めエネルギー下における均等粒径の粒状土の締固め機構

砂質土に於いても、ある程度以上の締固めエネルギーをうけると、締固め曲線の形状が OMC をもつ上に凸な curve を示す場合が多数見受けられる。しかし、標準砂のように同一の大きさの粒径をもつ粒状土に於いては、図-5に示すように液分に関係なく、締固め曲線の形状は

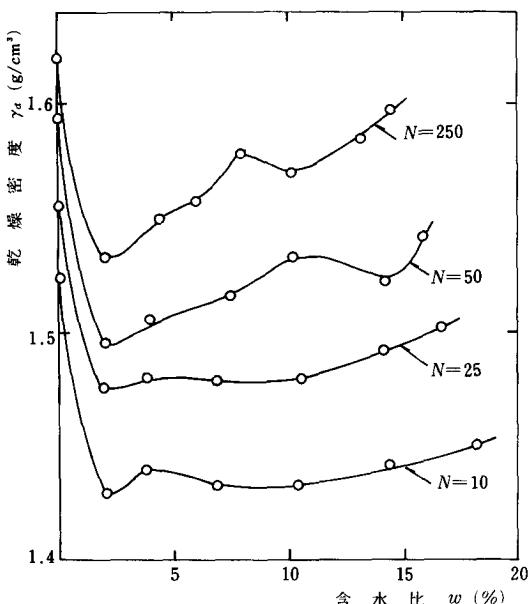


図 5 均等粒径の豊浦標準砂の締固め曲線

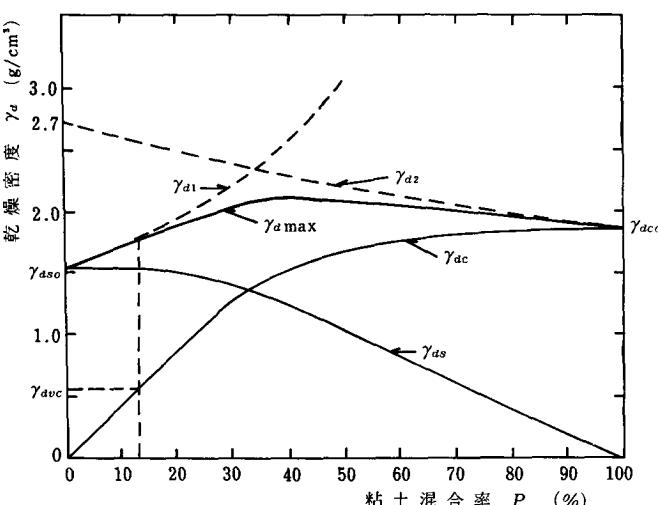


図 6 砂石・木節粒土混合土の最大乾燥密度と粘土混合率の関係

フラットな形状になる。これは、砂粒子が締固めエネルギーをうけると、そのエネルギーに見合った砂粒子による骨格構造が形成されるが、そのとき、砂粒子が殆んど同じ大きさであるため、その骨格のスキ間に他の粒子が入り込める余裕ではなく、砂粒子の配列構造そのものは変化し得ないためである。よって、締固めによる密度変化は粒子間のせん断抵抗の大きさに支配されることになる。即ち、液分が増すと、砂粒子間にメニスカスが発生し、粒子間のせん断抵抗の増加の影響があらわれ、乾燥密度は、乾燥時或いは飽和時に近い所の乾燥密度より小さくなるためと考えられる。

粒径の大小様々な砂粒子が混っている砂質土に於いては、液分の少ないときは均等粒径の粒状土と同様に、粒子間のせん断抵抗の影響により、乾燥密度は乾燥時より小さくなるが、液分の増加とともにメニスカスも少しづつ消滅し始め、粒子間のせん断抵抗も減少するに従って、砂粒子は動き易くなり、粒径の大きい砂粒子の形成する骨格のスキ間に小さい砂粒子が入り込むことにより、密度増加が助長されるため、締固め曲線が OMC をもつ curve となると考えられる。

4. 締固めた土の構造について⁸⁾

さらに土の締固めによる密度増加のメカニズムを詳しく解説する上で、締固められた土の中の粘土分・砂分の状況を明らかにすることが重要と考え、普通土の単純なモデルとして、均等粒径の砂と粘土の混合土をとりあげ、その締固めによりそれぞれの粒子の相互作用及び構造を考えることによって、一般的な締固め理論を導き出すことを試みた。

4.1. 締固めた混合土の構造についての考え方

種々の粘土混合率 P に対する締固め土の最大乾燥密度 $\gamma_{d\max}$ の値を、砂分の多いときは理論値 γ_{d1} 、粘土分の多いときは理論値 γ_{ds} と比較したものを図-6に示す。

この図-6で、 γ_{ds} は混合土の全体積に対する砂のみの密度であり、 γ_{dc} は全体積から砂分の体積を差し引いた残りの体積に対する粘土の重量を粘土の密度としたものであり、それぞれ、次式で求めた。なお、 G_s は砂粒子の比重である。

$$\gamma_{ds} = (1-P) \cdot \gamma_{d\max}$$

$$\gamma_{dc} = \frac{G_s \cdot P \cdot \gamma_{d\max}}{G_s - (1-P) \cdot \gamma_{d\max}}$$

一方、 γ_{d1} は理想的な混合土の状態と

して砂の骨格が不変としてそのスキ間に粘土を入れていった場合の混合土の密度であり、 γ_{d2} は粘土マトリックスの中に砂粒子を分散混入していった場合の混合土の密度であり、それぞれ次式で計算した。

$$\gamma_{d1} = \frac{\gamma_{dso}}{1-P}$$

$$\gamma_{d2} = \frac{G_s \cdot \gamma_{dso}}{P \cdot G_s + (1-P) \cdot \gamma_{dso}}$$

ここで、 γ_{dso} ：粘土のみを締固めたときの最大乾燥密度

γ_{dso} ：砂のみを締固めたときの最大乾燥密度
力学的見地から考えると、締固めた土の構造は作用した締固め力に見合った骨格強さのものでなくてはならない。砂・粘土混合土に於いて、このような構造の基本的なものとして図-7に示す2つの構造が仮定できる。

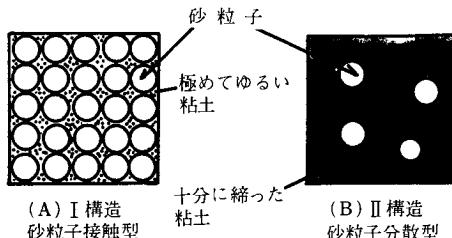


図7 砂・粘土混合土の基本的な2種の構造

図-7-A の I 構造は、砂だけを締固めたときと同じ砂の骨格をもち、粘土はその間ゲキ内に入り込んでおり、この間ゲキ内の粘土の密度は小さいものである。この I 構造では、砂が締固め力に見合った骨格強度をもつと考えられる。一方、図-7-B の II 構造は、粘土の中に砂粒子が浮いている状態を示し、粘土が締固め力に応じた骨格強度をもつため、粘土の密度は粘土のみを締固めたものと同じであると考えられる。

混合土について考えると、I 構造の間ゲキでは、粘土は極めてゆるい密度にしかならないので、粘土混合量が少し大きくなると II 構造が発生し、砂と粘土の混合比により、この2種の構造が種々の割合で混じり合うことになる。砂分の多いときは、図-8-A に示すように、I 構造が主体でその中に II 構造が点在することになり、粘土分の多いときは、図-8-B のような II 構造が主体でその中に I 構造が点在するものと考えられる。

また、I 構造では間ゲキ内に粘土が余り入り得ないので密度が上がりず、混合土としての密度増加を妨げるので、図-6 に於いて、最大乾燥密度 γ_{dmax} が、 $\gamma_{d1} \cdot \gamma_{d2}$ の理論曲線より低下する現象を無理なく説明することができる。

締固めた混合土に、このような I 及び II 構造が混在

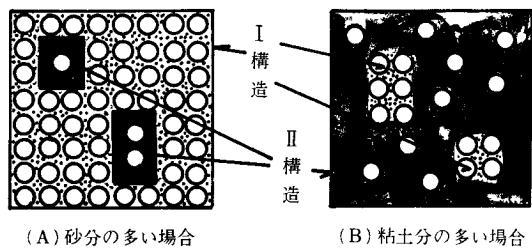


図8 締固めた混合土中のI・II構造

する根拠としては、次に示す実験結果より推定できる。

4.2. I 及び II 構造の存在の推定

粘土混合率の高い場合に於いて、混合の均一性を変えることにより混合土中の I 及び II 構造の存在を明らかにするため、次のような実験を行なった。

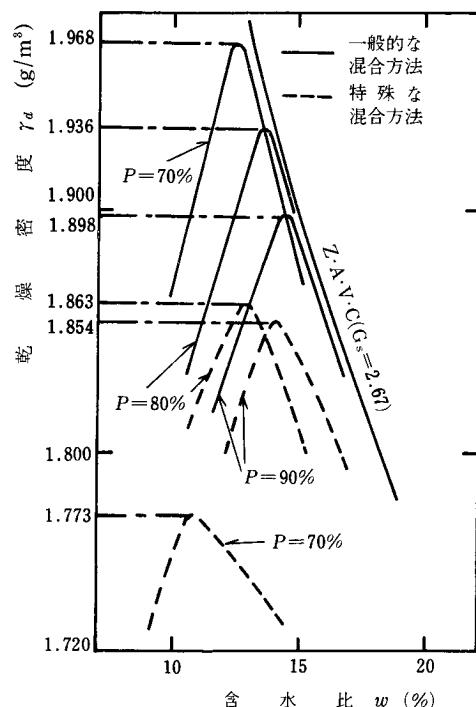


図9 試料の混合方法による締固め曲線の比較

粘土分に混合水量をあらかじめ加えて、十分練り混ぜた後に乾燥砂を混合した試料を作り、静的締固め試験を行ない、砂と粘土を混合した後に水を加える一般的な混合方法の試料の場合と比較し、この結果を図-9に示した。

この特殊な混ぜ方をした試料では、一般的な混合方法のものに比べて最大乾燥密度がかなり小さくなってしまい、その差は粘土混合率の減少に伴なって大きくなっている。これは、混合土中の砂分が粘土中に均一に分散せず、多

数の砂粒子の集まつたグループが散在しているためであり、このことはある程度肉眼でも観察できる。この砂粒子集合グループの間隙には粘土が殆んど入らないので、密度は小さくなり空気量が増すことになる。この場合、砂粒子集合グループが I 構造であり、その他が II 構造に当る。このような高い粘土混合率の場合、II 構造の中に I 構造が散在する現象は、砂粒子がすべて一個一個粘土中にバラバラに分散して混じらない限り生ずるわけで、一般的な混合方法の場合にもある程度 I 構造の存在が当然あるはずである。

砂粒子としては、大きくしかも丸く表面の滑らかなものほど一個一個に分散しやすいはずであるので、砂粒子の代りに平均粒径 2.6 mm のガラスビーズを用いて、一般的な混合方法で試料を作り、静的締固め試験を行なった。この結果より締固め土中の粘土の密度 γ_{dc} を求め、他の砂を混合した場合の γ_{dc} と比較し図-10 に示した。こ

ることができると思われる。粘土混合率が少なく砂分の多い場合にも、粘土が砂粒子の間に均一に分布するわけではないので、粘土分の多い部分が II 構造となり、これが I 構造中に散在することになると考えられる。

5. まとめ

(1) 締固め曲線の形状の変化、即ち、含水量の増加に伴なう乾燥密度の変化は、締固め時に於いて土粒子間に発生するセン断抵抗の大きさと、土粒子の配列構造の変化のし易さとが、含水量の違いで変わることによって起こることを明らかにした。

また、両者の要因による相互間の卓越度が、締固めエネルギーーや土質（粒度）により大きく異なるために、密度増加のメカニズムは数種存在することになる。

(2) 締固めの理論曲線と現実の曲線の差異についての考察から、締固められた混合土の構造状態について、本報では砂粒子及び粘土粒子の形成する 2 種の基本構造を提案し、締固め土はこの 2 つの基本構造の集合体であると推察した。

今後、この推論を種々の角度から調査して、推論の実証、或いは修正を行なうことが是非とも必要である。このことにより、はじめて、締固め土の密度増加のメカニズムや合理的な締固め方法の在り方などを明らかにできると考えられる。

(原稿受付 昭和 54 年 9 月 29 日)

謝 辞

本研究は、早稲田大学理工学部土木工学科森研究室に於いて昭和 50 年～54 年に実施されたものである。研究の遂行にあたって、日頃よりの懇切なる御指導を賜わりました早稲田大学教授 森 麟 博士に対しまして厚く御礼申し上げます。また、実験に協力いただいた同研究室の卒業生諸氏に謝意を表する次第です。

参考文献

- 1) R. R. Proctor 「The Design and Construction of Rolled-Earth Dams」 Engineering News Records. 1933.
- 2) Lambe, Whitman 「Soil Mechanics」 1960.
- 3) R. E. Olson. 「Effective Stress Theory of Soil Compaction」 ASCE SM2 March, 1963.
- 4) H. B. Seed, J. K. Mitchell, C. K. Chan 「The Strength of Compacted Cohesive Soils」 Shear Strength of Cohesive Soils. ASCE SM June, 1960.
- 5) 森 柴田、「土の締固めによる密度増加のメカニズムについて」第 2 報」第 12 回土質工学研究発表会・1977.
- 6) 森 実倉、「土の締固めによる密度増加のメカニズムについて」第 11 回土質工学研究発表会・1976.
- 7) 森 齊藤、「液分の性状にもとづく土の締固めの研究」土と基礎 Vol. 18 No. 2 1970.
- 8) 森 柴田、「締固めた砂・粘土混合土の構造についての考察」第 14 回土質工学研究発表会・1979.

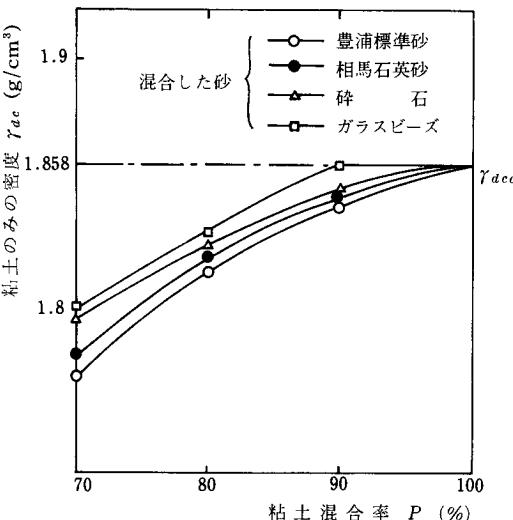


図 10 砂粒子の粒径の大小による粒土のみの密度の比較

の図によると、ガラスビーズを混合したときの γ_{dc} が最も大きく、粘土のみを締固めたときの密度 γ_{dc_0} に近い。また、粘土混合率 90% の場合には $\gamma_{dc} = \gamma_{dc_0}$ であるので、土はすべて II 構造のみで I 構造は存在せず、混合率 90% 以下では、 $\gamma_{dc} < \gamma_{dc_0}$ となるので I 構造が散在するようになることを意味している。このようにガラスビーズが他の砂を混合したときよりも γ_{dc} の大きいことは、一個一個に分散し易いため、I 構造が少ないとことを物語るものである。

以上の実験結果より、粘土混合率の高い混合土では、II 構造の中に I 構造が存在することをかなり確実視す