

水底砂地盤の衝撃締固めに関する一考察

深川良一*・室 達朗**・堀川周一***・
建山和由****

衝撃締固めを受ける水浸状態の砂地盤の締固め特性を一連の突固め実験により明らかにした。実験条件としてはランマの落下回数、落下高さ、重量、底面積を変化させた。比較のために気乾砂に対する同様な実験を実施した。各実験条件および締固めエネルギーと砂の締固め密度との関係を調べた。気乾砂ではほぼ投入した締固めエネルギーに見合った締固め効果が得られるのに対し、水浸砂では締固めエネルギーよりはランマの落下高さなどの実験条件の影響を強く受けることが判明した。

Keywords: compaction, impact, submerged sand, laboratory test

1. 結 論

沿海岸域に各種の構造物を構築する場合、構造物の沈下や倒壊を防ぐためには海底地盤の土質を改良し安全で耐久性のある地盤を造成しなければならない。この際、有効かつ一般的な土質改良手法としては、土を締固め、強度や変形特性などの力学特性を改善する方法が挙げられる。締固めは一般に静的締固めと動的締固めに分類され、さらに動的締固めは、衝撃締固めと振動締固めに分類される。陸上での締固めが従来より活発に研究されていることはいうまでもないが、水底地盤の、特に直接構造物の基礎となる水底の表層付近の締固めに関する研究は非常に少ない。わずかに、落錘による水底地盤の締固めに関する研究が、能町・遠峰・斉木(1979)¹⁾、石川・太田・岩村・松浦(1988)²⁾等によって報告されている程度である。能町ら¹⁾、石川ら²⁾の研究は実務性の高いもので水底地盤の締固めに関して実際の情報を与えているが、締固め施工条件の変化が地盤特性に及ぼす影響に関する言及は少ない。したがって、海洋工事の増加に伴い、海底地盤を効率よく改良する必要性が増えてきた現在、水中における地盤の動的締固め特性ならびに適用性を調べることは、海洋開発の観点からも緊急不可欠な課題と考えられる。

本研究では、水中において重錘落下を受けた砂の締固め特性と重錘の落下条件との関係を実験により考察した。重錘の落下条件としては、重錘の落下回数、落下高さ、重量、底面積を変えて実験を行い、これらの個々の要因ならびにこれらの要因の影響を総括した重錘のエネルギーと砂の締固め密度との関係を調べた。実験は、水

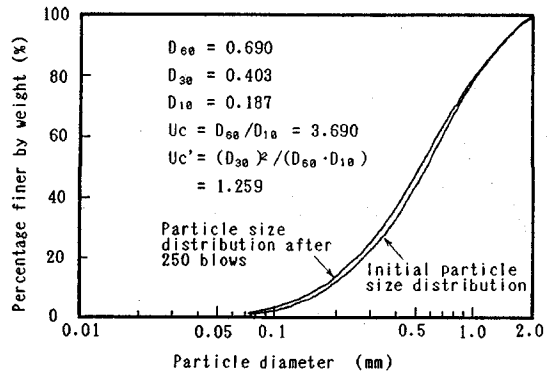


Fig.1 Percentage finer by weight of tested sand

中と地上での締固め特性の違いを明確にするため、気乾砂と水浸砂の2種類の試料に対して実施し両者の比較を行った。また、今回実施した突固めによる締固めの有用性を調べるため、同じ試料に対する静的な圧縮による締固め試験を実施し、両者の締固め特性を比較した。以上の実験結果をもとに水中における砂の衝撃締固め特性に関する知見をまとめ結論とした。

2. 試料砂

(1) 試料砂の特性

試料砂は海砂を用いた。まず2mmのふるいにかけて、通過したものを0.074mmのふるいにかけて残留したものをを用いた。また実験を行う際は、試料砂を天日で数日間乾燥させ、気乾燥状態にしたものを使用した。試料砂の比重は2.595、また土質工学会基準³⁾に基づく最大および最小密度はそれぞれ1.730, 1.376 (g/cm³)である。

試料砂の粒径加積曲線を Fig.1 に示す。均等係数、曲率係数、平均粒径を図中に示している。

(2) 粒子破碎の影響

本論文では主としてランマによる突固め試験を行って

* 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町3)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科 広島市

**** 正会員 工博 京都大学講師 工学部土木工学科

いるが、ランマによる突固めを繰り返す間に粒子破碎が生じ、実験の再現性が損なわれる恐れがある。そこで、標準的ランマ (2.5 kgf) を用いて、落下高さ 30 cm、落下回数が 0 回と 250 回の場合の粒径加積曲線を比較したが、この両者には大きな差はなかった (Fig.1)。また、本報告中の実験における最大落下回数は 50 回 (最大落下高さは 30 cm) でありかつ試験毎に試料砂を交換したため、粒子破碎が密度に及ぼす影響は無視できると判断した。

3. 静的圧縮による砂の締固め

(1) 実験方法

静的締固めとして一軸載荷試験機を用いてモールド内の試料砂の圧縮締固めを、気乾燥状態と水浸状態の両方の場合において行い、結果を比較した。実験には通常の締固め試験によく用いられるモールド (容積 997.46 cm³: 内径 100 mm, 高さ 127 mm) を用いた。載荷板の直径は 99.0 mm である。静的圧縮に際しては、モールド側面に薄くシリコングリースを塗り、摩擦の低減を図った。気乾燥状態での供試体は、試料の注ぎ口を供試体表面に常にほぼ接するように保ちながら注ぎ込み作成した。水中での供試体は以上の供試体を静かにゆっくり水槽中に沈めることにより作成した。結果的に気乾燥状態、水浸状態とも初期供試体密度はほぼ等しくなり、1.47 (g/cm³) ($D_r=31\%$) であった。水中供試体については供試体を水槽に全て沈めた状態で試験を行っている。

(2) 実験結果

後述のランマによる衝撃締固めと、ここで述べる静的締固めの結果を比較するため、静的締固め試験の結果を密度と締固めエネルギーとの関係で整理する必要がある。ここでは以下の考え方で静的締固めにおける締固めエネルギーと密度との関係を求めた。

まず、実験より求めた応力～ひずみ曲線を次式で近似した。

$$\text{気乾砂: } \sigma = 1.17 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^{2.20} \dots \dots \dots (1)$$

(相関係数 $r=0.997$)

$$\text{水浸砂: } \sigma = 9.16 \cdot 10^3 \cdot \epsilon^{2.18} \dots \dots \dots (2)$$

(相関係数 $r=0.999$)

ここに、 σ : 軸応力 (kgf/cm²)、 ϵ : 軸ひずみである。
単位体積当たり締固めエネルギーの増分 dE は次式で表される。

$$dE = \sigma d\epsilon \dots \dots \dots (3)$$

式 (3) に式 (1)、(2) を代入すると次のようになる。

$$\text{気乾砂: } dE = 1.17 \cdot 10^4 \cdot \epsilon^{2.20} d\epsilon \dots \dots \dots (4)$$

$$\text{水浸砂: } dE = 9.16 \cdot 10^3 \cdot \epsilon^{2.18} d\epsilon \dots \dots \dots (5)$$

式 (4)、(5) を積分し整理すると次のようになる。

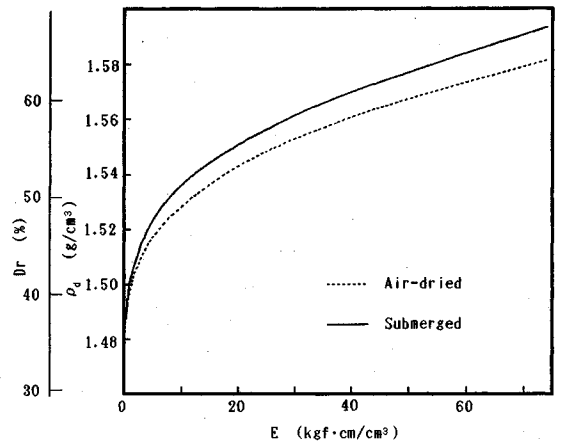


Fig.2 Relationship between dry density ρ_d and compaction energy E under static loading

$$\text{気乾砂: } E = 3.66 \cdot 10^5 \cdot \rho_d^{3.20} \text{ (kgf} \cdot \text{cm/cm}^3) \dots \dots (6)$$

$$\text{水浸砂: } E = 2.88 \cdot 10^5 \cdot \rho_d^{3.18} \text{ (kgf} \cdot \text{cm/cm}^3) \dots \dots (7)$$

Fig.2 は、一軸載荷試験機による静的締固めを行った場合の締固めエネルギーと乾燥密度の関係を示したものである。気乾砂、水浸砂とも初期乾燥密度はほぼ同じであるが、気乾砂よりも水浸砂の方がエネルギーの増加に対して密度増加の割合が幾分か大きいという結果である。水中で締め易いのは、基本的には水浸砂の方が粒子間の摩擦が減少し滑り易くなるため、それだけ体積の減少が生じ易いのであろう。なお、この図は後述の突固め試験結果と比較し、衝撃締固めと静的締固めの差異を考察するのに用いる。

4. 突固めによる砂の衝撃締固め

(1) 概 説

本章では、通常の Proctor の突固め試験機 (モールド、ランマ) を使用し、次のような突固め要因を変えることで気乾砂と水浸砂の締固め効果の違いを調べた。モールドは 3.(1) で説明したものと同一のものである。締固め要因は次に挙げる事項である: ①ランマ落下回数、②ランマ落下高さ、③ランマ重量、④ランマの底面積 (形状は円)。気乾砂、水浸砂に対する同様な一連の実験を行った。

(2) 実験方法 (Fig.3 参照)

実験は土質工学会の基準に基づいて行った³⁾。手順を以下に示すと、

気乾砂:

1) 気乾燥した試料砂を、カラーの付いたモールド (静的締固め試験に用いたものと同じのもの) 内にゆる詰めになるように 3 層に分けて注入し、各層毎に同じ落下高さで、同じ落下回数だけランマで突固める。

2) 突固めが終了したら、カラーを外し、直ナイフで

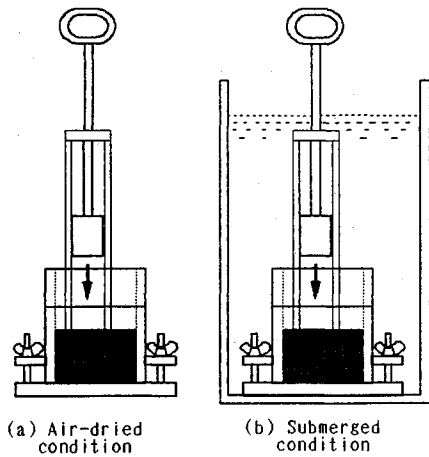


Fig. 3 Schematic view of compaction tests

余盛り部分を丁寧に取り除く。

3) モールド内の試料砂の質量を測定し、乾燥密度を算出する。

水浸砂:

1) 水槽の中にカラーの付いたモールドを沈め、その中に気乾燥させた試料砂をゆる詰めになるように3層に分けて注ぎ込み、各層毎に同じ落下高さで、同じ落下回数だけランマで突固める。この際、ランマ自身も常に水中にあり、水槽中の水深はおよそ70cmであった。

2) 突固めが終了したら、モールドを水槽から取り出し、カラーを外して直ナイフで丁寧に余盛り部分を取り除く。

3) モールド内の試料砂を乾燥炉に入れ一日乾燥させたのち、その試料砂の質量を測定し、乾燥密度を算出する。

(3) 締固めエネルギー

締固めエネルギー算定式としては、突固め試験の締固め仕事量の評価によく用いられる Proctor による仕事量(エネルギー)算定式³⁾を気乾砂、水浸砂両方の場合に用いるものとした。ただし、水浸砂の場合はランマ重量からそれに作用する浮力を差し引くものとした。

その締固め仕事量(エネルギー)式は次式で表される。

$$\text{気乾砂: } E = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{水浸砂: } E = \frac{(W_R - \gamma_w \cdot V_R) \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 E : 単位体積当たり締固めエネルギー ($\text{kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$), W_R : ランマ重量 (kgf), H : ランマの落下高さ (cm), N_B : 層当りの突固め回数, N_L : 層の数, V : モールド容積 (cm^3), γ_w : 水の単位体積重量 ($10^{-3} \text{kgf}/\text{cm}^3$), V_R : ランマ体積 (cm^3) である。

水中においてランマを落下させた場合、重力、浮力、水の坑力、付加質量力などが働くため、ランマを落下さ

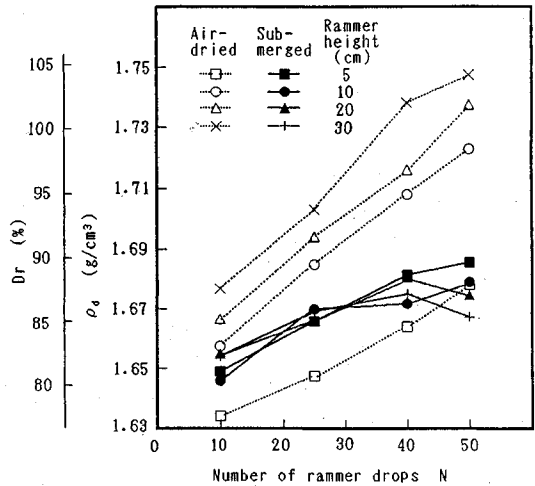


Fig. 4 Effect of number of rammer drops on compaction performances

せモールド内の試料砂に到達したときには、これらの抵抗を受けランマの速度は減少しており、ランマが試料砂に与えるエネルギーは式(9)では表せないが、それを正確に評価することは现阶段では困難である。したがって、今回の実験ではランマが試料砂に到達したとき試料砂に与えるエネルギーではなく、気乾砂の場合と同様な、ランマがあらかじめ有している位置エネルギーを基準にしてデータの整理を行った。なお締固めエネルギーの決定方法の影響については後に(5)節において考察を加える。

(4) 実験結果およびそのエネルギー的評価

a) 落下回数を変えた場合

2.5 kgf (陸上重量)の標準的ランマ(底面直径5cm)を使用し、落下高さを固定して落下回数だけを10, 25, 40, 50(回)と変えたときの乾燥密度の変化を調べた。参考までに締固めエネルギーではなく、落下回数 N および落下高さ H によって整理した結果を Fig. 4 に示す。落下回数の増加に連れ、気乾砂の場合今回の実験の範囲ではほぼ直線的に密度が増加しているのに対し、水浸砂では $N=40\sim 50$ で増加傾向が鈍るかあるいは逆に低下している。Fig. 4 では同一のランマを陸上および水中で使用しているため、厳密な意味では同一レベルで両者を比較することが出来ない。そこで式(8), (9)で表される締固めエネルギーによって結果を整理したのが Fig. 5 である。この図において、気乾砂ではどの落下回数においても締固めエネルギーの増大に対して密度は増加傾向にあることがわかる。また、Fig. 4 では落下高さにより締固め密度は異なっているが、Fig. 5 のように締固めエネルギーで整理するとこれらの結果は、落下高さ10cmの場合のみ多少ずれているが、ほぼ1本の曲線で表すことができ、全体としてみれば、締固めエネルギー

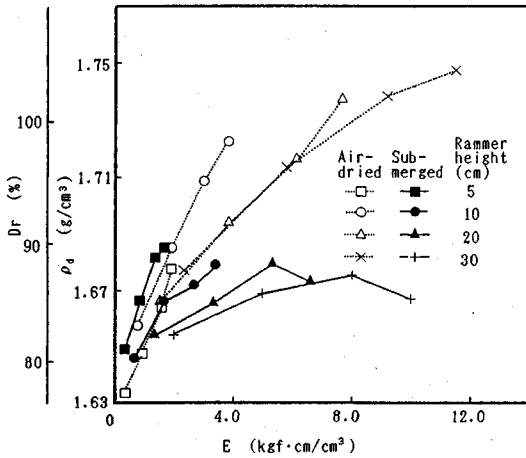


Fig.5 Relationship between dry density ρ_d and compaction energy E when number of drops and rammer height are changed

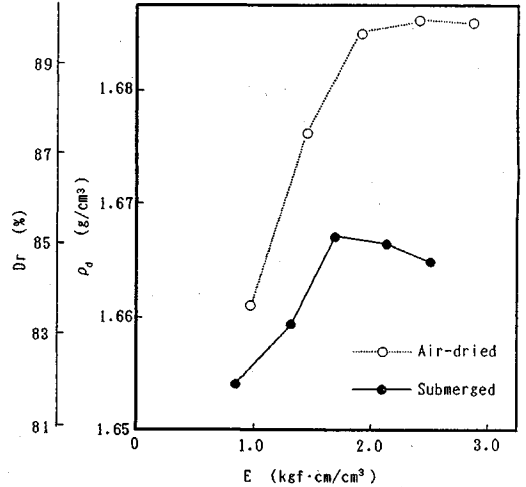


Fig.7 Effect of rammer weight on the Relationship between dry density ρ_d and compaction energy E

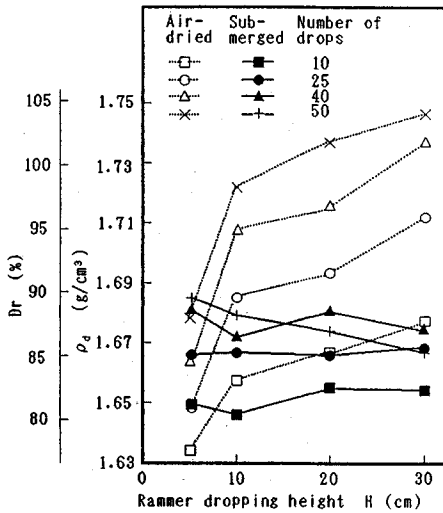


Fig.6 Effect of rammer dropping height on compaction performances

と密度との間にはほぼ1対1の対応関係がありそうである。これに対し、水浸砂では、特にランマ高さが20, 30 cmと大きくなるに連れ、締固めエネルギーの増大が密度の増加に結びつかないという傾向を示す。水中では、もともと締固めという目的に使用されることを期待されている位置エネルギーが、締固めのみではなく、地盤の破壊に使われている場合があることを示唆している。

b) 落下高さを変えた場合

2.5 kgf (陸上重量) のランマ (底面直径 5 cm) を使用し、落下回数を固定して落下高さだけを5, 10, 20, 30 (cm) と変えたときの乾燥密度の変化を調べた。(4) a) の場合と同様な実験結果を落下高さ H によって整理したのが Fig.6 である。この場合も気乾砂と水浸砂では対照的な結果が現れている。気乾砂では $H=5\sim 10$ cm

で急激な密度増加があり、 $H=10\sim 30$ cm でもほぼ直線的な密度増加が達成されている。これに対し、水浸砂では、 H の増加に連れ全体に横ばいか (落下回数が少ないとき)、逆に低下する傾向 (落下回数が多いとき) を示している。落下高さは水浸砂の締固め特性を考慮する上で注意すべき要因であることがわかる。Fig.6 を締固めエネルギーに基づいて整理し直したものは基本的に Fig.5 と同一である。

c) ランマ重量を変えた場合

落下高さを 10 cm, 落下回数を 25 回に固定して、ランマ重量だけを 1.25, 2, 2.5, 3, 3.75 (kgf) (いずれも陸上重量) と変えていったとき、乾燥密度および相対密度がどう変化していくかを調べた (Fig.7)。このときランマ底面の直径はいずれも 5 cm である。この図において、気乾砂、水浸砂とも締固めエネルギーが約 2.0 kgf·cm/cm³ までは密度は増加傾向にあるが、それ以降は密度増加は横ばいである。したがって、これ以上エネルギーを大きくしていてもあまり締固め効果は期待できない。

d) ランマ底面の直径を変えた場合

落下高さを 10 cm, 落下回数を 25 回に固定し、ランマの単位底面積当たり荷重 (陸上での) が一定 (0.127 kgf/cm²) となるようにしながらランマ底面の直径を 1, 2, 3, 4, 5, 6 (cm) と変えた。そのときの乾燥密度および相対密度の変化を Fig.8 に示す。この場合、ランマ高さが一定であるので、底面積が大きくなると比例的に重錘重量も大きくなるため締固めエネルギーも大きくなる。Fig.8 で特徴的なことは、締固めエネルギーの小さい領域ではむしろ水浸砂の方が大きい密度が達成されているということである。後述するように水浸状態では本図で示した締固めエネルギーが過大に評価されていると

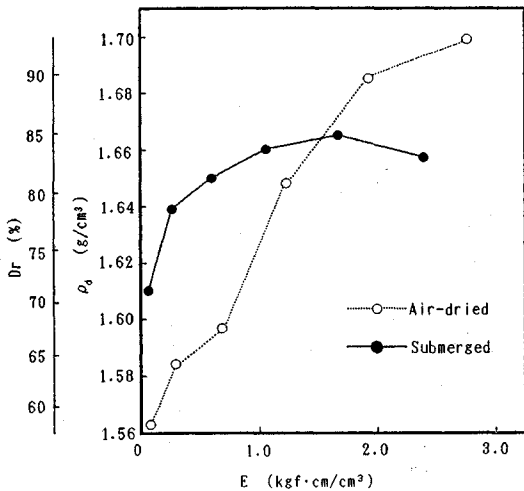


Fig.8 Effect of rammer bottom area on the relationship between dry density ρ_d and compaction energy E

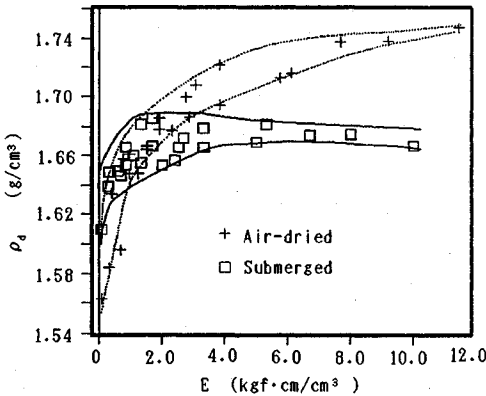


Fig.9 Comparison of compaction characteristics of air-dried sand to those of submerged sand

予想されるので、この傾向は一層助長されることになる。また、Fig.8より、水浸砂では締固めエネルギーを増やしても大きな密度増加は期待できないが、気乾砂の場合は逆にエネルギーを増やしていくほど大きな密度増加が得られることがわかる。水浸砂において、ランマの底面積が増大すると、衝突時、底面下砂中の水の移動が拘束され間隙水圧が上昇するため、結果的に地盤の弱体化が引き起こされることになる。また、透水（排水）条件を考慮すれば、水中での実験結果は、ランマ直径とモールド内径（100 mm）の関係によって影響を受けることが予想される。つまりランマが大きくなると、ランマによる地盤の圧縮の結果生じた排水の流出が妨げられることになる。よって、もし異なる内径のモールドが使用されれば結果が修正される可能性がある。また、ここでは底面積にしか言及しなかったが、接触面からの排水を容易にし、水からの抵抗をそくような工夫を凝らした締固め

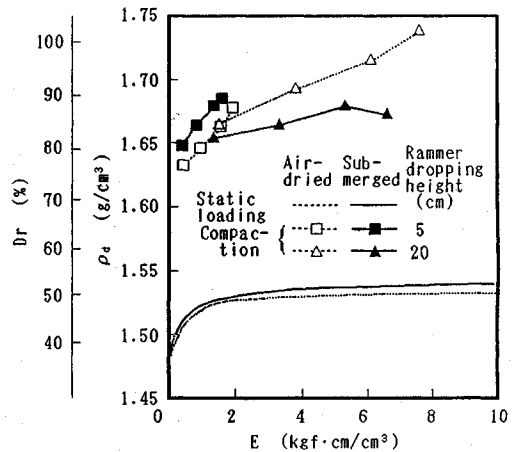


Fig.10 Energetic evaluation of the results of static loading and compaction using rammer

性の良いランマ形状なども今後は研究されるべきであろう。

e) 気乾砂および水浸砂の締固め特性の比較

Fig.9には以上の結果を重ねて示している。特徴的なことは、水浸砂の締固めにおいては締固めエネルギーの増大に対して密度が単調に増加し、ほぼ $E \sim \rho_d$ 間に1対1の対応関係を見いだせるのに対し、水深砂の締固めにおいてはエネルギー増加が単純に密度増加に結びつかないということであろう。また、水浸状態では低エネルギーレベルにおいて達成される密度のばらつきも大きい。既に述べてきたように、これらの密度のばらつきは、ランマの重量、形状、落下高さ、落下回数などに依存するため、これらの締固め施工条件には慎重な考慮を払う必要があることがわかる。

(5) 静的締固めとの比較

Fig.10は、Fig.2に示した静的圧縮締固めの結果とFig.5中のランマの落下高さを5 cmまたは20 cmに固定して突固めた場合における乾燥密度と締固めエネルギーとの関係を取り出して示したものである。この図において、与えられた同一エネルギーに対して圧縮締固めよりもランマによる突固めの方がかなり大きな乾燥密度の値を示している。つまり、ランマによる突固めの方がよく締固まるということである。気乾砂、水浸砂とも静的締固めよりは突固めを行った方がはるかに有利であるといえる。しかし水浸砂の場合、静的締固めにおいては気乾砂よりも乾燥密度の値が若干大きく、また、突固めにおいては落下高さが20 cmよりも5 cmの方が小さなエネルギーで乾燥密度の値が大きいことから、突固めにおいても余り衝撃性の大きくないような落下条件で最適な締固めが達成されると予想できる。

(6) 締固めエネルギーの補正の影響

以上の考察において締固めエネルギーは、全て式(8)、

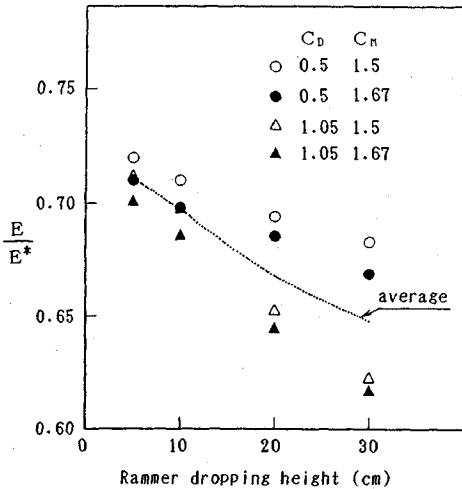


Fig.11 Effect of fluid resistance on energy of dropping rammer

(9)に基づいて決定したが、可能なら流体の抗力、付加質量力などを考慮して締固めエネルギーを算定するのが望ましい。以下いくつかの仮定に基づいて締固めエネルギーを算定してみよう。

中村・上北・飯野 (1975)⁴⁾は水中落下物体の落下時の運動方程式を次式のように示した。

$$\rho_R V_R \dot{v} = g(\rho_R - \rho_W) V_R - C_D A_R \rho_W v^2 / 2 - C_M \rho_W V_R \dot{v} \quad (11)$$

ここに、 ρ_R ：ランマの密度、 A_R ：ランマ底面積、 V_R ：ランマ体積、 v ：ランマ落下速度、 \dot{v} ：ランマ落下加速度、 g ：重力加速度、 ρ_W ：水の密度、 C_D ：抗力係数、 C_M ：付加質量力係数である。

式(11)に基づいて H だけ落下したときの速度 v_H は、

$$v_H = v_c \sqrt{1 - \exp\left\{-\frac{2gH(\rho_R/\rho_W - 1)}{(\rho_R/\rho_W + C_M)v_c^2}\right\}} \quad (12)$$

のように表せる。ここに v_c は定常状態に達したときの速度で、

$$v_c = \sqrt{\frac{2gV_R(\rho_R - \rho_W)}{C_D A_R \rho_W}} \quad (13)$$

となる。 C_D 、 C_M は厳密には落下速度によって変化するため、一義的には決められないが、試みに一定値とみなして以下のエネルギー補正を行ってみる。

水理公式集 (1978)⁵⁾に依れば、定常流中におかれた球及び立方体(1つの面に流れが直交する)に対する C_D 、 C_M はそれぞれ球の場合 0.5、1.5、立方体の場合 1.05、1.67 となる。ランマのような形状を有するものについては、丁度これらの中に位置するものと考えられるため、試みに球及び立方体の場合にエネルギー損失がどの程度になるかを式(12)、(13)を用いて調べてみる。

Fig.11 にランマが空気中を落下した場合と水中を落下した場合のエネルギー比 E/E^* とランマ落下高さ H の

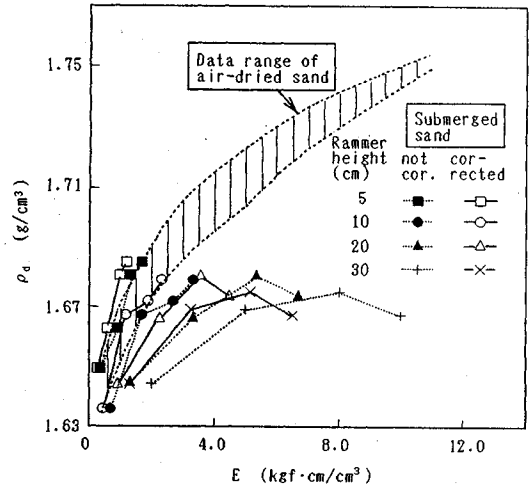


Fig.12 Effect of energy modification on compaction performances

関係を示している。エネルギー比は、浮力に相当する分を減じた重量を持つランマが空気中で H 落下したときの速度を v_H^* とすれば、次式が成立する。

$$\frac{E}{E^*} = \frac{1/2 \cdot \rho_R V_R v_H^2}{1/2 \cdot \rho_R V_R (v_H^*)^2} = \frac{v_H^2}{(v_H^*)^2} \quad (14)$$

Fig.11 は、式(12)、(13)に前述の範囲の C_D 、 C_M の値を代入し、式(14)を用いて種々の落下高さにたいするエネルギー比を求めたものである。この図より、 C_D 、 C_M の選択によって結果は幾分の幅を有するが、概ね 28~33% 程度のエネルギーロスとなることがわかる。

今仮に、Fig.11 のそれぞれのケースの平均値でランマ落下時のエネルギーロスが算定されるものとして突固め試験結果を整理し直すと、Fig.5 に示した $\rho_d - E$ 関係は、Fig.12 に示されるように修正される。エネルギー補正を施すことによって、達成されたエネルギーの幅が 30% 程小さくなるものの定性的な傾向が変化するまでには至らないようである。

一般にランマの落下のような衝撃荷重により砂を締固める場合、水中と気中における締固め特性の差の原因としては、

- i) 水中ではランマの落下時の運動が水の流体抵抗の作用を受けて変化するというランマ側の要因
- ii) 水中の土が衝撃を受けたときの土の挙動が水の影響を受けるという土側の要因

の両者が考えられる。この節で議論した流体抵抗を考慮したエネルギー補正の議論は前者の原因について考察したものであるが、式(12)、(13)によって v_H 、 v_c を決めるために C_D 、 C_M を正確に評価する必要のあること、また今後、後者の土側の要因についても詳細な考察を行う必要のあることを示唆している。

(7) 深さ方向への衝撃締固めの影響

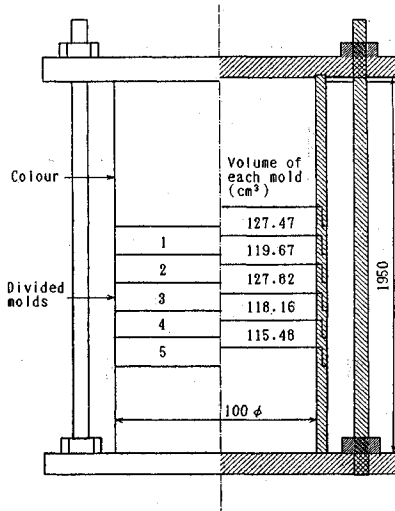


Fig.13 Multi-layer compaction apparatus

今までに述べた突固め実験における乾燥密度の算出は、モールド内全体の気乾砂重量をモールド容積全体で除したものであった。そのため、モールド内の深さ方向への密度変化の様子はわからなかった。本節では5段よりなるモールドを使用し、ランマの落下高さを変えた場合の深さ方向への密度の変化の様子を調べ、落下高さを変化させることで深さ方向への密度変化に大きな影響があるか否かを調べた。また、気乾砂と水浸砂での結果を比較した。

a) 実験方法

気乾砂、水浸砂での実験の大まかな流れは本章(2)で述べたものと基本的に同じである。概略を以下に示す。

気乾砂においては、まず気乾燥させた試料砂をカラーの付いた5段階式モールド(各段階のモールド寸法:約φ100×15 mm, Fig.13)内に上からふり注ぐようにして、ゆる詰めになるようにカラー上端まで注入する。注入後、落下回数を25回にして重量2.5 kgf、底面直径5 cmのランマで締固める。落下高さは5, 10, 20, 30 cmの4種類である。突固め終了後、モールド内の各段階ごとの試料砂の質量を測定し、乾燥密度を測定する。

水浸砂においては、まず水の入った水槽の中にカラーの付いた5段階式モールドを沈め、その中に気乾燥させた試料砂を上からふり注ぐようにしてゆる詰めになるようにカラー上端まで注入する。以下突固めまで陸上の場合と同様である。突固めが終了したら、モールドを水槽から取り出し、カラーをはずして直ナイフで丁寧に余盛り部分を取り除く。モールド内の各段階ごとの試料砂を乾燥炉にいれて一日以上乾燥させた後、その試料砂の質量を測定し、乾燥密度を算出する。

b) 実験結果および考察

Fig.14は、落下高さを5, 10, 20, 30 cmと変えていっ

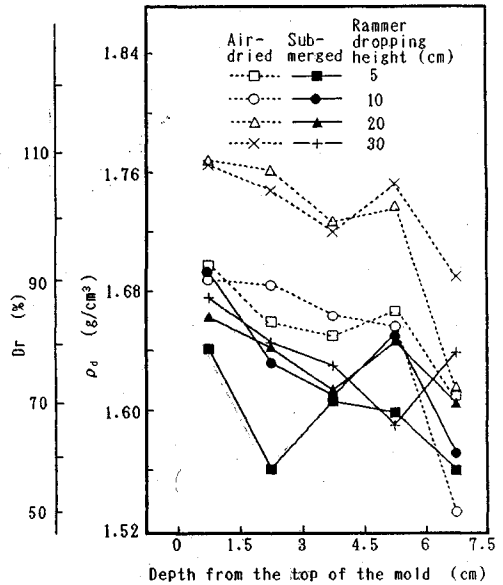


Fig.14 Density profile of the compacted sand in the mold

た場合の乾燥密度及び相対密度と深さとの関係を示したものである。この図より指摘し得ることを以下に示す。

- i) 一般的にみれば、締固めエネルギーの相違を考慮に入れても気乾砂の方が水浸砂より締固め易い。これは今までの実験結果と一致する。
- ii) 気乾砂ではランマ落下高さの増大に密度もほぼ対応して増加する傾向にある。一方、水浸砂では、平均的にはランマ落下高さ5 cm以外ではほぼ等しい密度が得られているものの、全体的にみればばらつきが大きいことが分かる。このことはランマによる締固めが締固めのみに使われるのではなく、部分的に土の構造骨格の破壊に用いられ、しかもその影響の度合いが試行の度ごとに変化するため、結果がばらつき易いことを意味している。
- iii) 気乾砂、水浸砂双方において、5 cm程度の深さにおいて部分的に密度が増加するという結果がみられた。建山(1988)⁶⁾の塑性波動理論による締固めの計算によれば、半無限地盤の地中密度は深さと共に減少(その程度は締固めエネルギーの与え方によって異なる)するから、これらの実験結果は突固め試験容器が有限な境界条件を有すること、あるいは容器内壁とモデル地盤との間に摩擦が存在する事に起因すると推測される。

5. 結 論

本研究は、水浸砂の砂地盤の締固め特性を明らかにすることを目的とし、動的締固めの内衝撃締固め(ランマによる突固め)の基本的特性を主として調べたものである。また、比較のために静的締固めおよび気乾砂に対す

る同種の実験を行った。本研究によって得られた主要な結果は次の通りである。

(1) 気乾砂の締固めにおいては、締固めエネルギーの増加に対して密度の増加がほぼ1対1で図れるのに対し、水浸砂の締固めは、締固めエネルギーよりはランマ落下高さ、落下回数など実験条件の影響を強く受けることが明らかになった。

(2) 水浸砂の締固めでは、静的なものより突固めが、また突固めの中でも比較的落下高さの低いものが効果的であった。また落下高さが低い場合落下回数の増加は密度の増加をもたらした。

(3) ランマ重量、底面積に関しては、あるエネルギーレベル以上エネルギーを増加させても密度の増加は図れないような限界値の存在が示唆された。

(4) 密度の深さ方向の変化を調べたところ、ランマ衝突時地盤がより乱される結果、水浸砂では気乾砂より

深さ方向の密度のばらつきが大きいことが分かった。

参 考 文 献

- 1) 能町純雄・遠峰孝栄・斉木由裕：落錘による水底地盤の締固めに関する考察，土木学会第34回年次学術講演会講演概要集，II-300，pp.595～596，1979.
- 2) 石川陸男・太田勝矢・岩村栄世・松浦一雄：大水深捨石マウンドの締固め効果に関する一考察，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集，III-253，pp.548～549，1979.
- 3) 土質工学会編：土質試験法，1979.
- 4) 中村充・上北征男・飯野達夫：海中落体の着底衝撃に関する研究—人工漁礁の設計外力の算定—，第22回海岸工学講演会論文集，pp.483～487，1975.
- 5) 土木学会編：水理公式集，pp.522～523，1978.
- 6) 建山和由：土の締固め施工の合理化に関する研究，京都大学博士論文，1988.

(1991.7.20 受付)

A CONSIDERATION FOR IMPACT COMPACTION OF SANDY SEA BED

Ryoichi FUKAGAWA, Tatsuro MURO, Shuichi HORIKAWA and Kazuyoshi TATEYAMA

It is important to evaluate the compaction characteristics of submerged sand since the quality of compacted sea bed is much influenced by the compaction methods. However, there are only a few studies concerning the compaction of submerged sand. The aim of this paper is therefore to make clear the basic mechanism of the compaction of submerged sand. Some factors including rammer weight, rammer dropping height and number of rammer drops etc. are experimentally scrutinized by use of conventional Proctor compaction apparatus. A series of tests using air-dried sand is conducted to compare with the properties of submerged sand.