

ネジリ振動による砂質地盤の締め固め試験 (その1)

齋藤 二郎 岩本 相一
(東洋大学工学部)
木村 薫 北村 仁

Compaction Test of Sand Bed by Torsional Vibration (Part 1)

Jiro Saito Soichi Iwamoto
Kaoru Kimura Hitoshi Kitamura

Abstract

Several methods of compacting sandy ground are already in existence and all of these methods directly aim for increase in bearing capacity of ground. However, considering the fact that the artificial hardening properties of the ground depend on the stress path thereof, there should be a method applying energy to the ground in accordance with the purpose of ground stabilization. From this viewpoint, it appears necessary to force horizontal vibrations on soil particles for earthquake resistance, especially as a ground stabilization method against external force in the form of shear waves during earthquake. For the above reasons, the authors are investigating the appropriateness of the method of compacting ground by torsionally vibrating rods penetrating the ground. The main contents of this report are comparisons of compaction efforts according to shapes of penetrating rods. In essence, with four types of penetrating rods it was verified that a flat wing-shaped rod is most effective according to data of cone indices, generated torques and horizontal accelerations, and relative densities of sand beds.

概 要

砂質地盤を深層まで締め固めるのは、既に種々の工法がある。それらはいずれも、直接には地盤の支持力を増加させることを目的としている。ところで、地盤の加工硬化特性がその応力経路に依存することを考慮すると、地盤に対するエネルギーの加え方には、地盤改良の目的に応じた方法がある筈である。この観点により、地盤を耐震的ならしめること、とくに地震時のセン断波の形式の外力に対する地盤改良工法としては、地盤の土粒子に水平方向の振動を強制することが必須である。以上の理由により、地盤に貫入するロッドにネジリ振動を加えることにより、地盤を締め固める工法の妥当性を検討している。本報告では、貫入ロッドの形状による締め固め効果の比較を主たる内容としている。その概要は、4種の形状の貫入ロッドについて、コーン指数・発生するトルクと水平加速度・地盤の相対密度などのデータの比較から、平らな形の貫入ロッドが最も有効であることが判明した。

1. まえがき

地盤を締め固めるのは、いずれの方法によれ、力学的には土の加工硬化特性を利用している。

図一1に示すのは、通常よく行なわれる三軸試験の応力経路ベクトルである。 σ_a' 、 σ_r' はそれぞれ軸方向ならびに側方向の有効応力である。この図では、横軸に平均主応力 $p' = \frac{1}{3}(\sigma_a' + 2\sigma_r')$ 、縦軸に軸差応力 $q = \sigma_a' - \sigma_r'$ をとっている。図中の圧密圧力 p_e' を起点として無数の方向に応力経路ベクトルが可能であるが、

図一1には11例のものを示している。加工硬化特性を調べるには、 p_e' 起点として、ある応力経路についてくり返し応力を作用させてみるのが良い。

図一2(龍岡による富士川砂の例¹⁾)に示すのは、図一1の $p_e' \sim 1$ の応力経路でくり返し応力を4回作用させた後、図一1の $p_e' \sim 8$ の応力経路でくり返し応力を3回作用させ、再び $p_e' \sim 1$ の応力経路に戻したものである。横軸に応力比 q/p' 、縦軸に体積ひずみ v (収縮が正)をとっている。図一2の図中の1→2にかなりの体積ひずみが生じている。これはいわゆる塑性ひ

ずみ（永久ひずみ）である。これを除荷したのが図中の2→3である。ところで3→9のように、一たび塑性ひずみを生じさせたものは、同じ応力径路について、 q/p' がかつて受けたもの以下の範囲では、ほとんど塑性ひずみ加わらないことが分る。即ち、近似的に弾性化したと言える。この過程は一種の加工硬化である。

以上の例は、一つの応力径路について、 q/p' により発生する体積ひずみに関するものであった。ところで、加工硬化特性は、セン断により発生する体積ひずみ v のみならず、セン断ひずみ r についても、また圧密により発生する体積ひずみ v についても成立するものである。粘性土に対する圧密促進工法とか、砂質土に対する締め固めという作業は、エネルギーを何らかの形で地盤に加えるのであるが、加えた荷重方法によって、将来それと同じ荷重履歴に耐えうるように加工硬化させておき、変形を弾性範囲にとどめて、有害な塑性変形（永久変形）を予防するのが基本となっている。

ところで図-2の9→15であるが、図-1の $p_c' \sim 1$ で加工硬化させたものが、図-1の $p_c' \sim 8$ のように応力径路をかえると、以前に受けた q/p' 以下のものに対しても再び塑性ひずみが発生している。従って、土の加工硬化特性はそれが受ける応力径路に依存する。この点は、締め固めを行なうさいに留意されねばならない。

耐震的な締め固めというものを考慮すると、セン断波に近い形式の外力を地盤に加えるのが適切である。セン断波の特徴は、それが土粒子を水平方向に振動させることにある。そこで、土を水平方向に振動させる地盤改良が望ましい。この試みの一つとして、貫入ロッドのネジリ振動による地盤の締め固めというものが考えられる。

本報告は、以上の意図のもとに、貫入ロッドのネジリ振動による締め固めの効果を確かめる為に行なった一連の模型実験のうち、貫入ロッドの形状による比較試験を主とした内容としている。

2. 試験装置ならびにモデル地盤の作成

試料は利根川砂を #2.5mm のふるいでふるい、その通過分を用いた。これは川砂の中でも比較的細目である。図-3にその粒径加積曲線を示す。均等係数 $U_c = 2.18$, 真比重 $G_s = 2.77$, 最大間隙比 $e_{max} = 0.967$, 最小間隙比 $e_{min} = 0.652$ である。

均一な地盤を作成する為 Walker & Whitaker²⁾の方法に依った。この方法は、上部のホッパーをスライドさせて砂質土を流出させて薄く堆積させることをくり返して、何層にも積み上げて密度が均一な砂層を

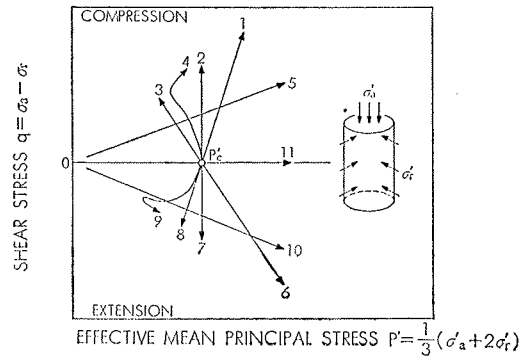


図-1 種々の応力径路ベクトル

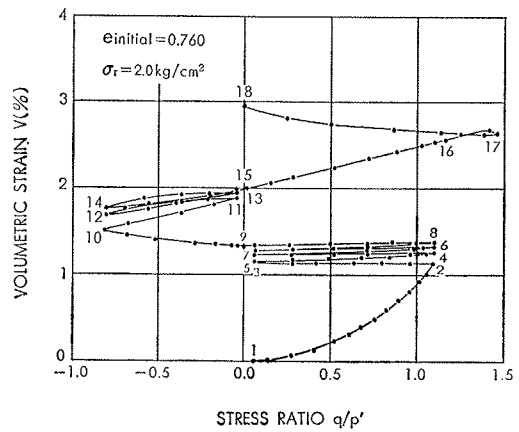


図-2 くり返し応力比と体積ひずみ

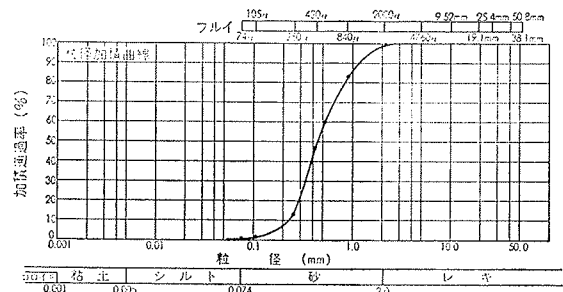


図-3 試料の粒径加積曲線

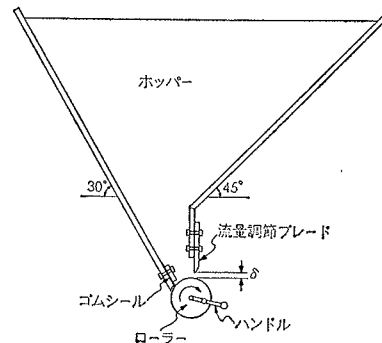


図-4 砂まき出しホッパー

つくり上げるものであるが、その際、ホッパーからの流量が大きいほど密度が小さくなる性質を利用したものである。

図-4に砂まき出しホッパーの断面図を示す。これのローラを回転させながら土槽の長手方向に往復させつつ砂を落としていくわけであるが、この図の流量調節ブレードの開き δ を変えることによって流量を調節して、密度の異なった均一な地盤をつくっていくものである。本報告では、 $\delta=20\text{mm}$ の場合のみを示している。

図-5に4種の形状の貫入ロッドを示す。貫入ロッドの形状は無数に可能であるが、試作的にこの4種を製作した。本報告では、理想的な貫入ロッドの形を求める為、とりあえずこの4種の形状の貫入ロッドでの締め固め効果の比較を行なうことが主たる目的となっている。ロッドの径は各々、 125mm 、長さは 1000mm である。

図-6にモデル地盤にロッドが貫入した状態の断面図を示す。モデル地盤は $1\text{m} \times 1\text{m} \times 2\text{m}$ の角槽に、前記の方法で、深さ $D=70\text{cm}$ の厚さまで乾燥砂を堆積させたものである。この状態で、上から $0.6\text{kg}/\text{cm}^2$ までの載荷圧を加えることができるようになっている。この地盤に、図-5の貫入ロッドを一定の速度で、深さ 65cm まで貫入させ、一定の時間ネジリ振動を加えたのち、ネジリ振動を加えながら引き上げるものである。この過程で、ロッドの回転角とトルク、地盤に発生する水平加速度を測定する。また試験前後で、モデル地盤の重量とその表面変位、コーンペネトロメータ試験を行なっている。

3. 試験結果とその検討

図-7に試験の各段階におけるコーンペネトロメータの値 q_c の一例を示す。これは図-5のうち、A型羽根のものである。この値は、加振中心から距離 30cm の位置のものである。 q_{c1} は堆積状態のままのもの、 q_{c2} はそれに $0.6\text{kg}/\text{cm}^2$ の載荷圧をかけた状態のもの、 q_{c3} は載荷の状態では振動をかけたもの、 q_{c4} はこの状態から載荷圧を零に戻したものである。地盤の水平方向の強度増加を、鉛直方向のコーンペネトロメータで測るのは若干問題があるが、この点に留意して今後のデータを見ていく。砂質土の場合、コーン指

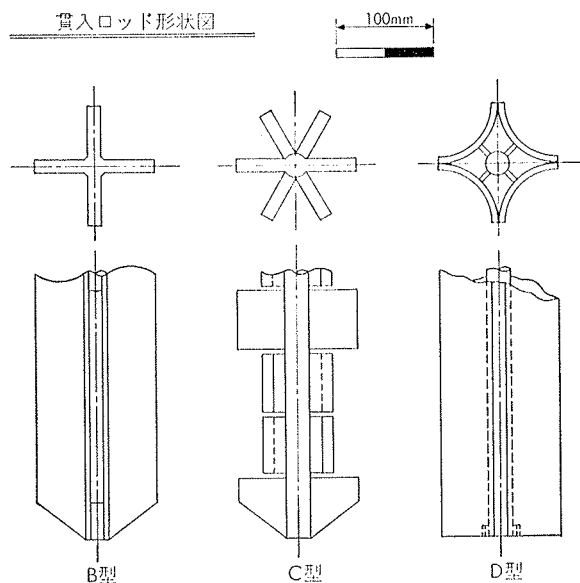


図-5 貫入ロッドA, B, C, D型

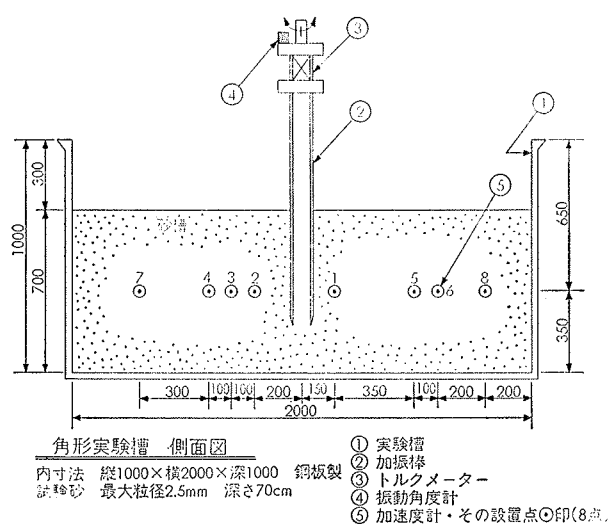


図-6 実験槽の側面図

数は N 値に比例する量と言われているので、この量はそのまま地盤強度を反映するものと見なされる。

図-8は、図-7の q_c 値のうち、 q_{c3}/q_{c2} の値を百分率で、地盤深度 30cm 、 40cm 、 50cm につき示したものである。この例は図中にも示してある通り、図-5のA型羽根の、図-4の $\delta=20\text{mm}$ の場合の、片振幅 $\theta=7^\circ$ で振動数 3.7Hz で振動を加えた場合である。これは、載荷圧の加わった地盤内の状態を再現する為、 $0.6\text{kg}/\text{cm}^2$ の圧力をかけた状態で、加振前後の q_c の変化をみたものである。これによると、地盤の深さによる差違はあまりない。貫入ロッドの近傍(貫入ロッド

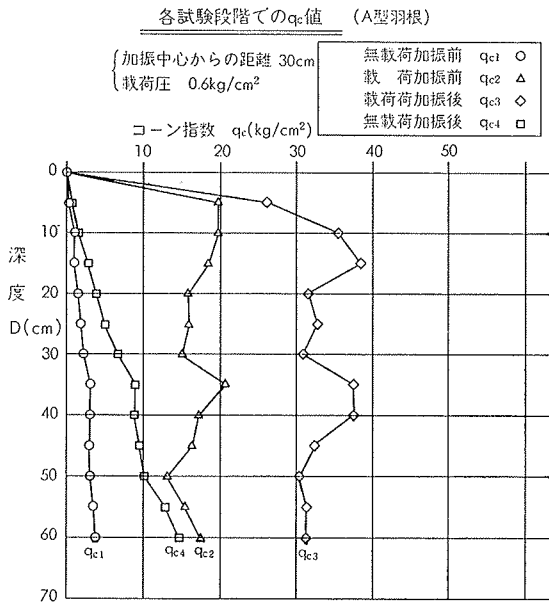


図-7 各試験段階でのコーン指数 q_c の一例

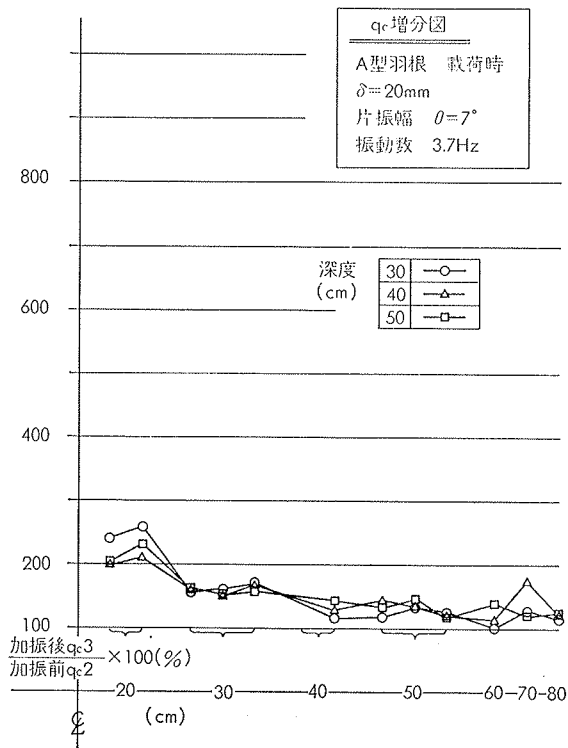


図-8 コーン指数 q_c の増分 (載荷圧 0.6 kg/cm²)

下の加振センターから 20cm の距離) で q_c 値は約 200 ~ 250% に増加している。また、その増加率は、貫入ロッドのセンターから離れるにつれて減少している。

図-9 は、図-7 の q_c 値のうち、 q_{c4}/q_{c1} の値を百分率で、地盤深度 30cm, 40cm, 50cm につき示した

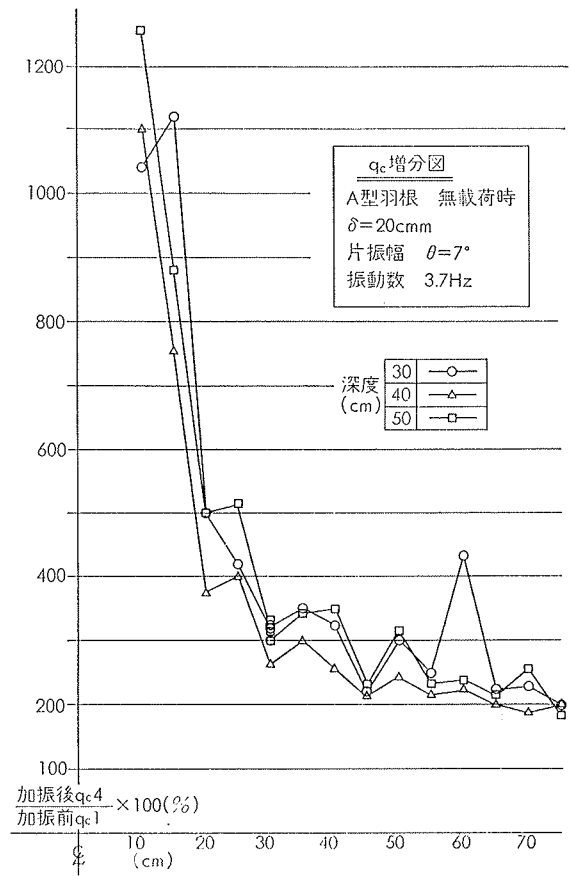


図-9 コーン指数 q_c の増分 (載荷圧ゼロ)

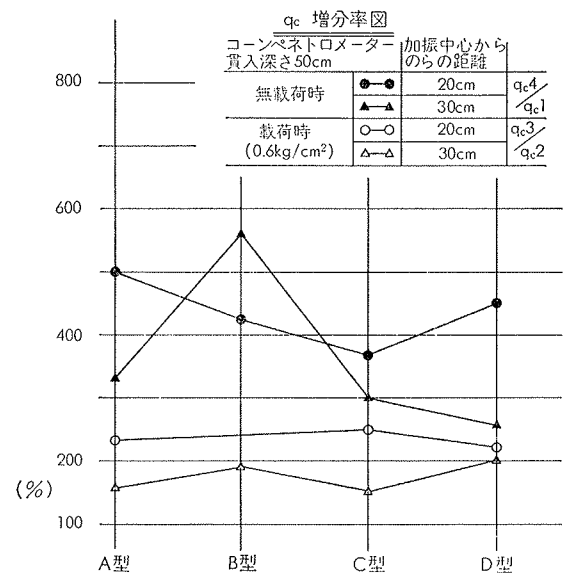


図-10 コーン指数 q_c の増分率の比較

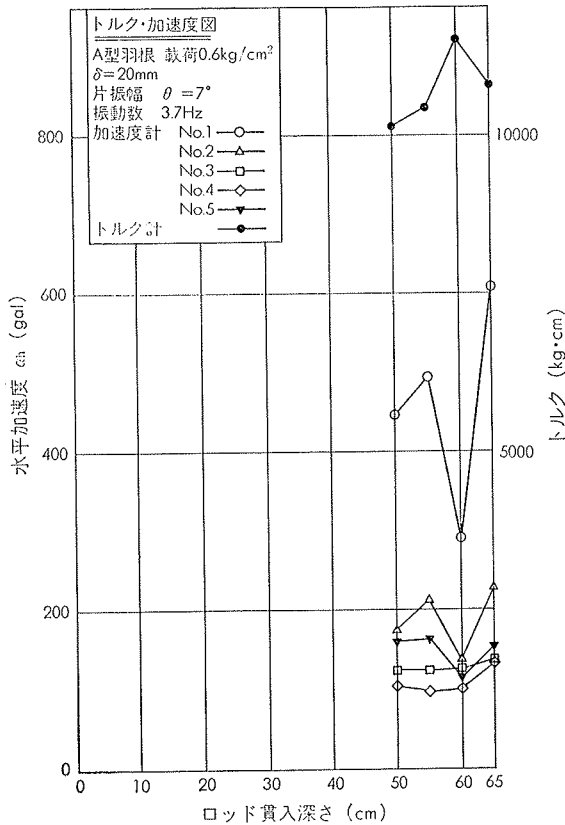


図-11 発生するトルクと水平加速度

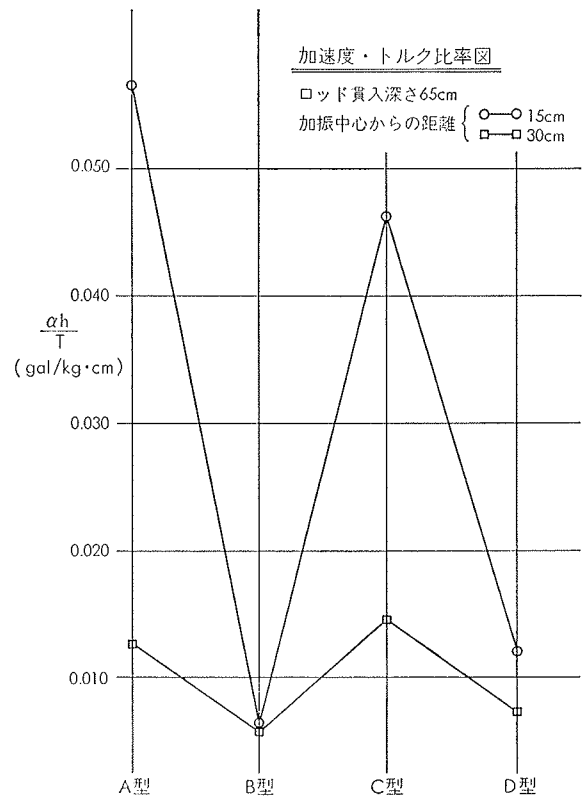


図-13 ah/T の値のロッド形状による比較

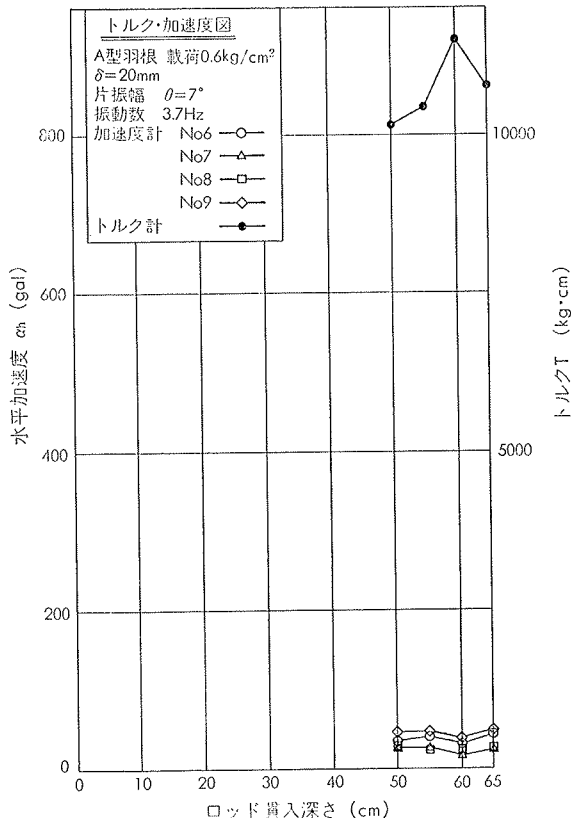


図-12 発生するトルクと水平加速度

ものである。これも地盤の深さによる差はあまりなく、貫入ロッドのセンターから10cmの距離で1000~1300%、20cmの距離で400~500%の増加率を示している。また、その増加率が貫入ロッドのセンターから離れるにつれて減少しているのは、図-8と同じである。これは、載荷圧のない状態での改良効果の比較である。

図-8と図-9の q_c の増分のうち、どちらが本当の地盤改良効果を表しているかは問題のところであるが、筆者達は、載荷圧をかけた状態での比較である図-8の方が現実に近いものと考えている。従って、この工法では、振動影響範囲内で、鉛直方向の q_c 値ならびにN値にして、約2倍の増加が予想されることになる。

図-10は q_c による以上の比較を、図-5の4種の形状のロッドにつき行なったものである。傾向はあまり定かでなく、 q_c に関してはどれもほぼ同じ程度のものであるが、比較的A型が良いようである。

そこで、別の角度からも検討を行なう。図-11と12は、図中に示すように図-8と同じ試験条件で行なった場合の、ロッド貫入深さに対して発生する、振動中のトルクTと地盤の水平加速度ahの最大値である。加速度計の位置は図-6に示す通りである。当然のこ

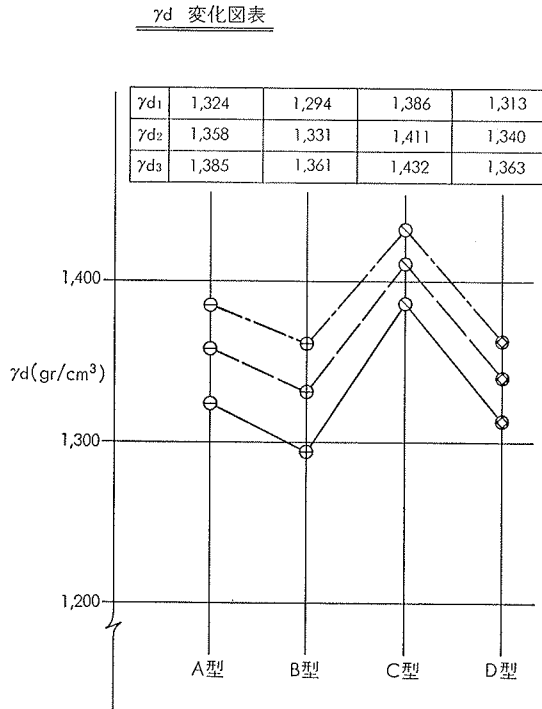


図-14 各ロッド形状につき密度の変化

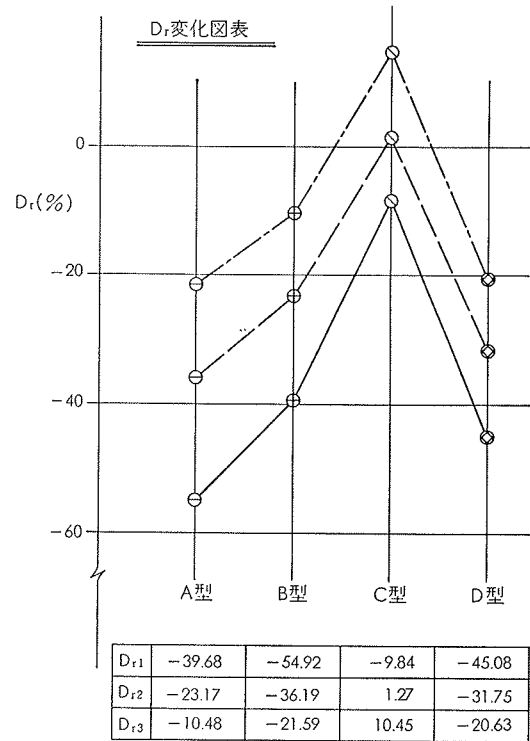


図-15 各ロッド形状につき相対密度の変化

とであるが、貫入ロッドに近いほど大きな水平加速度が発生している。この水平加速度とトルクの関係から、締め固め影響範囲が推定できるのであるが、その詳細は省略するとして、その範囲は直径にして、貫入ロッドの直径の約3～5倍である。これは西田³⁾の計算値とも一致する。

図-13は、図-11と12の様式のデータをもとにして、ロッド貫入深さが65cmの時点で、水平加速度 ah とトルク T の比 ah/T を図-5の各形状につき比較したものである。定性的には、この値が大きいほど地盤改良効果も大きいものと見なしうる。この結果では、A型とC型が良いようである。

図-14には、振動による地盤密度 γ_d の変化を示したものである。 γ_{d1} は試験前の初期密度、 γ_{d2} は試験後のモデル地盤の土槽全体での平均密度、 γ_{d3} は貫入ロッドを中心にして直径60cmの範囲の密度である。 γ_{d3} の設定は、前述の締め固め影響範囲内での密度という意味である。これらは、地表面の沈下量から測定したものである。

一様な地盤を作るという意味では、 γ_{d1} は各々の形状の貫入ロッドにつき同じでなければならないが、実際にはそうでない。従って、 γ_{d1} の値そのものは比較

の対象とはならないが、その変化量は十分意味があるものと思われる。 γ_{d1} と γ_{d3} の差を比較すると、A、B、C、Dの各型で各々0.061、0.067、0.045、0.050 gr/cm^3 の増加である。

同じことであるが、これを相対密度にしたのが図-15である。 D_{r1} 、 D_{r2} 、 D_{r3} が γ_{d1} 、 γ_{d2} 、 γ_{d3} に対応している。A、B、C、Dの各型で各々34、29、23、25%の増加がある。これからみると、A型とB型が改良効果が大きく、しかも地盤改良工法として十分なりたちうるだけの改良効果をもっていると言える。

以上の結果、図-10、13、15から総合的に判断して、図-5の4種の形状のうちA型が、最も適した形状であると言える。

参考文献

- 1) 龍岡文夫：三軸セン断装置による砂の変形特性に関する基礎的研究，東京大学学位論文，(1972, 12)
- 2) Walker, B. P. & Whitaker, T.: An Apparatus for Forming Uniform Bed of Sand for Model Foundation Tests, Geotechnique, (1967)
- 3) 西田義親：砂地盤に及ぼすクイの締め固め範囲の計算，土と基礎，Vol. 13, No. 8, (Aug. 1965)