

杭基礎をもつ構造物の耐震性

Aseismicity of a Structure with Pile-Foundations

久保 慶三郎*・佐藤 暢彦*

Keizaburo KUBO and Nobuhiko SATO

杭基礎は施工性および経済性から最近さかんに構造物の基礎に用いられている。小口径の垂直杭からなる杭基礎について、耐震設計上の問題点、大型振動台の機能を述べ、大型振動台を用いての標記構造物の振動実験の概要、理論計算の考え方について説明した。振動試験の結果、杭の周囲の土の杭の曲げに及ぼす影響の特性の一部が明らかにされた。

1. ま え が き

杭基礎には、確実に硬い層に下端を支持させ、確実な支持力で構造物を支持する支持杭構造と、硬い岩盤には杭の先端が到達はしないが、上部の荷重を杭の周囲の摩擦で支持し、土への支持力をなるべく広く分布させて構造物の荷重を支える摩擦杭構造とがある。本文において、実験的ならびに理論的にその耐震性を解析した杭構造は前者の支持杭構造であって、後者の摩擦杭構造については次の機会に研究することにする。

最近杭構造を用いると工期が短縮できるなどの理由から、この形式の基礎が多く用いられ、杭の直径も次第に太くなってきた。井筒基礎とそれほど差異のないと思われるほど太い径の杭基礎も実施されている。大口径の杭については、問題点も多いので、本文で研究対象とする杭はそれほど太いものではないことにする。

従来、国鉄、道路公団、建築学会などの示方書に規定されているところによると¹⁾、垂直杭には水平抵抗力をとらせないか、または杭頭に水平力が作用しないように設計すべきことになっている。構造物に作用する地震荷重のような水平力は、基礎構造の前面に働く土圧で抵抗させるか、または斜杭によって抵抗させることになる。しかしながら、土質工学の進歩とともに垂直杭の水平抵抗に関する研究もまたさかんに行なわれ²⁾、特に運輸省の港湾技術研究所では多年にわたって多くの研究がなされてきた。これらの研究のほとんどが静力学的研究であったが、垂直杭の水平抵抗力の存在が確かめられてきた。これと同時に、垂直杭の設計も徐々に変化し、示方書の規定も変わりつつあるように思われる。

垂直杭でも十分杭頭に作用する水平力に抵抗できるのであれば、施工に難点がありかつそれほど傾斜してはいない斜杭に水平力をとらせるのは賢明な方法ではない。しかしながら、垂直杭は地震時に十分水平抵抗力を示すのであろうか、特に杭の周囲の地盤が地震時にはげしく振動してくると、杭を支えていた地盤が逆に杭を押す現象が発生するのではなからうか、などの問題が究明されなければならない。なぜかという、杭に関する研究のほとんどが静力学的研究にとどまっているからである。著者は千葉実験所に設置された大型振動台を用いて、かなり大きい模型で振動実験を行ない、地盤を振動させた場合の垂直杭をもつ構造物の動的挙動の研究を始めた。研究はその緒についたばかりではあるが、序報として、大型振動台の機能、構造および性能を述べ、大型振動台を用いて最初に行なった杭基礎の振動実験および得られた

結果と理論解析の概要について述べる。

2. 大型振動台について

振動する砂箱を用いて、わが国で始めて擁壁に作用する地震時土圧の研究³⁾が行なわれてから、すでに 20 数年が経過した。小型の砂箱の実験では一般に、砂の垂直方向の重さが水平に作用する慣性力に比して小さくなり、重さの無視されたような実験が行なわれる危険性がある。また、このような実験においては、重力の効き方が減少しているので、砂の粒子間の粘着力と圧力に比例する摩擦力との関係が、実物の場合と異なったものになり、後者の力は前者の力に比して模型では小さくなりがちである。特に土のような材料は単に相似律を無理に満足させようとして、土の粘着力、せん断波の速度などをある程度以上に変化させると、およそ土というカテゴリーとは異なったものの実験をしていることになり、実物とは似て非なるものの研究になりかねない。築堤、アーサダムなどのような土構造物、土で支持された構造物の解析、土と構造物との相互作用の研究などを行なう場合は、上述の理由から、あまり小さい模型で振動実験を行なうと、相似律が全然満足されないか、満足されたとしても、実物の土の性質が著しく変化した材料での実験を行なっていることになる。このために、模型の縮尺をあまり小さくすることは困難になる。今回千葉実験所に設置された大型振動台も、土または粒体構造物、土と構造物との相互作用などを研究する目的で計画されたものであったので、振動台に固定した砂箱の容積は、必要最小限の長さ 10m、深さ 4m、幅 2m とした。

砂箱の幅の最小限は土または粒体と壁面との摩擦から決定され、摩擦の影響が壁面から遠くまで影響すればするほど、最小幅を大きくしなければならない。運輸省港湾技術研究所の大型振動台(長 5m×深さ 1.5m×幅 2m)を参考にして、最小幅を 2m とした。深さは偏心傾斜荷重を受けた地盤のすべり面(すべり面の最深部が 3m と考えている)が底面の摩擦に邪魔されない深さから決定した。砂箱の長さは地盤のすべり面が端部の壁による影響を受けないという条件から決めた。本振動台の砂箱を用いて実験すると、実物の地盤の厚さとして 15m 程度の層が模型と実物との間の相似律を十分に満足させて、振動試験を行なうことができると考えられる。

80m³ の砂箱は積載された土の重量と砂箱の重さとして 170 t にもなるので、400 gal (砂の流動化の加速度)までの加速度で振動させ、しかも実際の地震と同じように不規則振動波形を与えるとすると、これに要するエネルギーは膨大なものとなる。そこで土と構造物との相互作用

* 東京大学生産技術研究所第 5 部

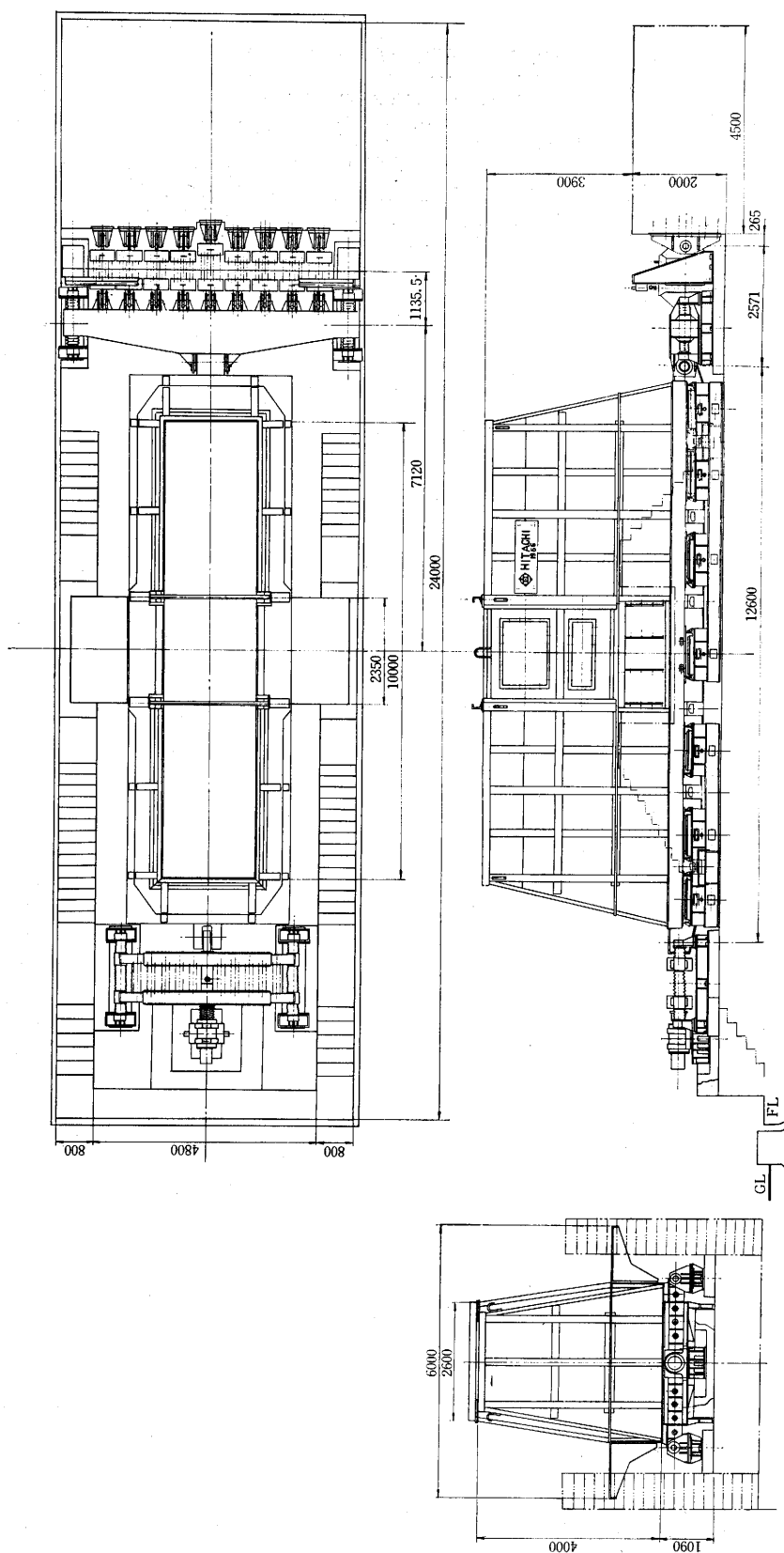


図 1 大型振動台設計図

に関する各種の問題の基本的性質を十分研究することに、設置の第一目的を限定し、定常波振動に限ることとした。このような考え方をすれば、加振機とバネとの共振が利用され、小さいエネルギーで大きい振幅、大きい加速度の振動を振動台に与えることができる。加振機は電動油圧式（最大出力 20 t）としたので、積載荷重が小さい場合には、く形波、三角波、および不規則波を振動台に与えることができる。バネの周期は 9 組のバネの組み合わせで変えることができ、それぞれの周期の間隔は入力の変動数を変化させて連続的に埋められるようになっている。

本振動台は、目的が上述のごとくであるので、振動台の振動周期は 0.1~1.0 sec とした。最大変位は現在のところ、 $\pm 50\text{mm}$ で、最大加速度は 400 gal である。加速度の 400 gal は軟弱地盤の流動化、および流動化地盤の構造物基礎への影響を研究するのに必要な加速度値から決めた。またこの位の加速度で振動台を振動させることができると、構造物の動的破壊試験も行ないうると考えている。

振動台の振幅、周期、および波形は図 2 に示す設定部のメータで入力として与えられ、設定部の指令どおりに振動台が振動しているか否かを、振動台に設置された変位計によって検出されフィードバックされるシステムになっている。電動油圧装置によって加振し、バネとの共振を利用して振動台の振幅を増大させ、振動台の変位計によって与えられた振動か否かを検査し、それによって再びサーボ弁の作動を制御する一連の方式は本設計の作業と平行して一度模型実験で確かめておく必要があると考えたので、工場の方に模型実験を依頼して、実施してもらった。その結果、本振動台の設計において採用した一連の方式はほぼ妥当なものであるが、振動台の加速度

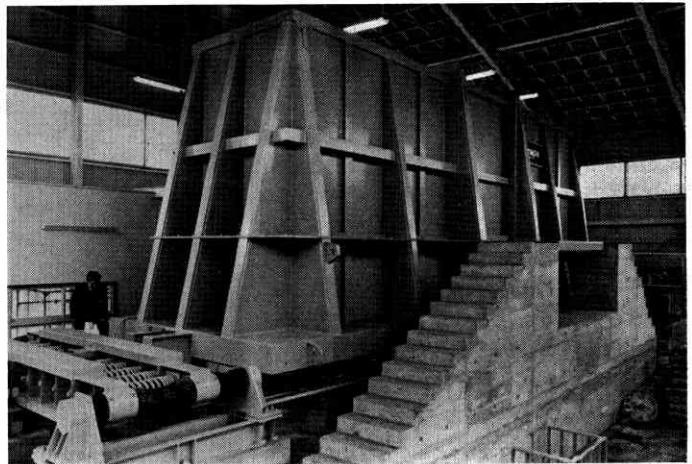


写真 1 振 動 台

波形を正しい正弦波形にするため、および緩衝用とするため、バネをアクチュエータと振動台との間にもそう入することにした。

水平に運動する振動台と、それを支える固定した基礎のコンクリートブロック（本振動台の場合は後述するように防振上からゴムで支えられているので、わずかな振幅ではあるが振動するので、厳密な意味で固定ではない）との間には、摩擦の少ない支持装置が必要である。二、三の研究所の振動台の支持装置を調査検討し、油圧による浮上装置を使用することにした。図 2 に示すように、ポンプからの油を下から送り、振動台底面とのわずかなすきまを通して油を流すと、細いすきまを通るために、油の圧力が上がり、この圧力で振動台を浮上させる方式である。この装置を用いたので、摩擦力は極端に小さくなり、アクチュエータの出力の浪費の節約にもなるし、また振動台の波形をなめらかにするのにも役立った。

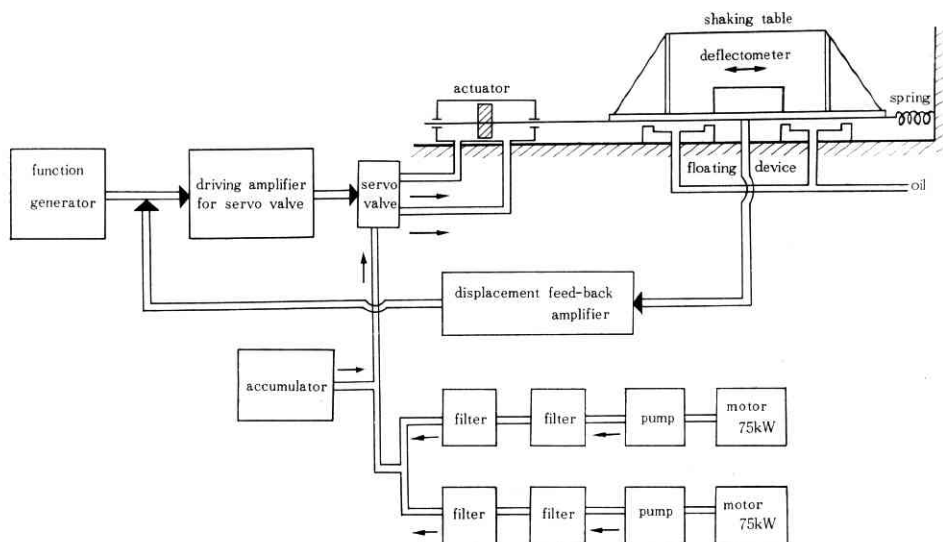


図 2 振動台の機構

砂箱の重量は大きく(約 180 t)、また最大加速度も大きい(400 gal)ので、砂箱の振動時のエネルギーが、そのまま地盤に伝搬されると、周囲の建物を振動させ、またその中で行なわれている実験の障害になり、振動台による実験は不可能になってしまう。振動台の防振の考え方として、ダイナミックダンパー的な考え方をし、振動する約 180 t を約 1,200 t のコンクリートブロックで支持し、このコンクリートブロックをせん断抵抗の弱いゴムブロック(25 cm 立方)54 個で支持せしめた。この結果コンクリートブロックの固有周期は約 3 秒である。せん断抵抗が弱いゴムブロック(保証耐圧力 50 t)を使用することにより、地盤への水平せん断力をも小さくする作用もあわせ利用することができた。最大加速度で振動台を振動させているときにも、建屋内の床(固定部分)ではほとんど振動を感じない位で、計器による測定も困難なほどの小さい振動しか伝搬されていないことが明らかにされている。

振動台の加振方向は砂箱の長手方向のみであるので、たとえば橋の橋軸直角方向の振動試験のごとく長い構造物をそれと直角方向に振動させ、その振動性状を研究するために、振動台に翼をつけ、砂箱の中央部の壁を取りはずすと、加振方向に直角に平な長いプラットフォームが形成されるようにしてある。

3. 振動台を用いての振動実験

杭として変形しやすく、かつ適当な板厚をもたせるためにアルミ合金の杭を使用した。外径は 100 mm、板厚は 1.5 mm、長さ 3,140 mm であった。この中空のアルミ

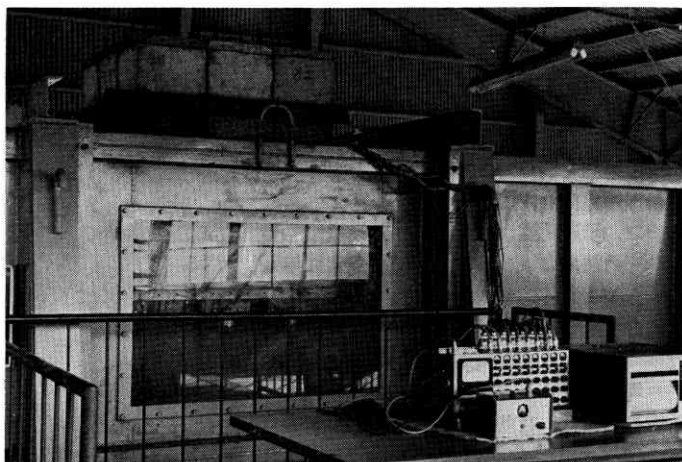


写真2 振動台側面からみた供試体

合金杭を9本使用し、42 cm 間隔で、3行3列に配置し、その上に、コンクリートブロックを載荷し荷重とした。杭の下端は振動台の床に固定するようにし、また杭の上端は荷重のコンクリートブロックを支持する鋼製の台に固定されるようにした。杭の固定部の埋込長さは 10 cm であった。コンクリートブロックは 100 kg を1単位として、最大 45 個、すなわち 4.5 t の荷重が杭の上端に載せられる。9 個を1段としてあるので、荷重は 900 kg ずつ変化させて載荷重の杭基礎構造の振動特性に及ぼす影響を実験できるようにした。各列のブロックは垂直のボルトで締め、かつ、各列相互の相対運動を防ぐために、ブロック間は2段に水平に締め付けた。

地盤としては人工地盤を用いた。地盤は火力発電所で

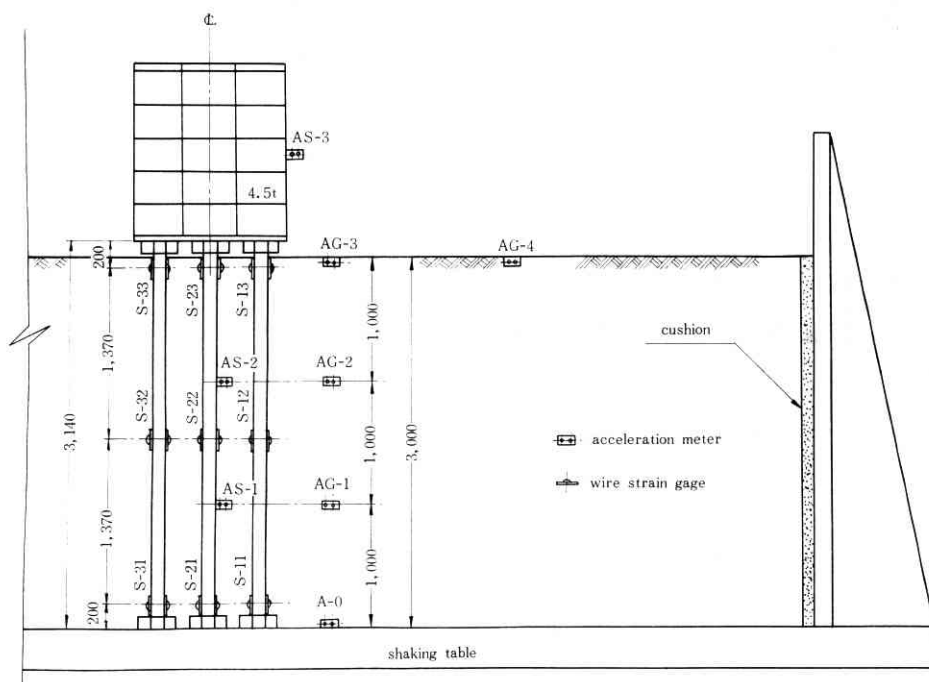


図3 振動試験に用いた杭基礎構造

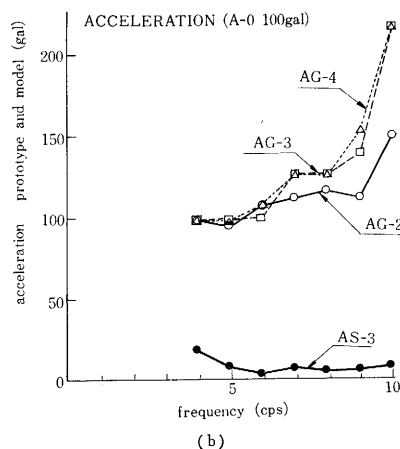
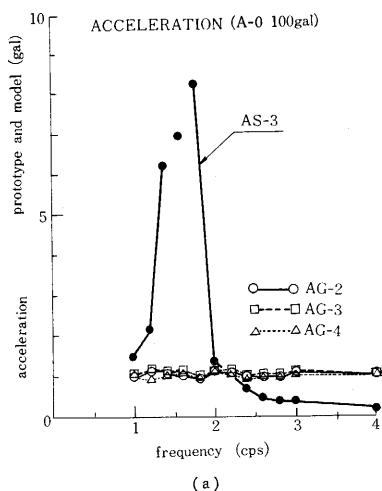


図4 加速度と周期との関係

生成されるシンダーサンドを絶縁油で混合して作製した。人工地盤を作るに用いる材料については、材質のみならず強度、配合、動的特性などについて十分研究されなければならないと考えるが、最初の試みとして、水で混合するよりは蒸発がなくて時間的に安定していると考え、上記の材料を用いた。砂箱に充てんするに先立って、 0.3m^3 程度の混合物を作り、ペンテストによる粘着力の試験を行ない、表1の結果を得た。実際には砂と油との重量配合比は 8:2 であった。

表1

| 砂と油との比 | 8:2 | 7:3 |
|---------------------------------|-------|-------|
| 粘着力 (kg/cm^2) | 0.061 | 0.013 |

砂層の厚さは 3.0m とした。したがって、コンクリートブロックの支持台は砂層より上にあり、荷重（コンクリートブロック）は杭のみで支持された状態で試験された。上部の荷重が周囲の地盤と杭とに支持される場合については、さらに引続いて実験する予定である。

測定器は加速度計とひずみ計を用いた。前者は振動台および土中の加速度、特に長手方向および深さ方向の加速度分布の測定に用い、後者は杭の曲げ応力、軸力の測定用であった。加速度計およびひずみ計の配置を図3に示す。

現在までに行なった実験は、振動台の周期と地盤加速度、杭の曲げ応力、軸力の測定で、その結果を以下に述べる(図4, 5 参照)。実験は最大加速度で 180gal までが主であって、地盤および構造物の破壊が発生しない範囲で行ない、最後に周期約 0.4 秒で 400gal 近くまで加速度を増加させた。

地盤加速度と振動台の周期との関係は次のごとくである。

- (1) 実験の範囲内では、砂箱中央の加速度 (AG-3) と模型と壁との中間の加速度 (AG-4) とはほぼ同一の加速度値を示している。このことは砂箱中の地盤の振動が長手方向にほぼ同一の運動を行なっていることを意味しており、端壁からの反射波がほとんど

ど存在していなく、く形水槽内の流体の運動にはなっていないことを示している。

- (2) 振動数で 5cps までは、地盤の加速度は砂箱中ではほぼ一様分布をしており、振動台と同じ加速度であることが、AG-3, AG-2, AG-4 を比較して結論される。

- (3) 振動台の固有周期が地盤の固有周期に近づくにつれて、地盤の振動がはげしくなるが、その状態においても、AG-3 と AG-4 とはほぼ同一の加速度値を示している。しかし地中では、地表より加速度が小さくなっている。その分布は図4 (b) に示されている。図4は振動台の加速度をすべて 100gal に統一して整理されたものである。

振動台の周期と構造物の加速度および杭の応力との関係は次のごとくである。

- (1) 荷重であるコンクリートブロックにつけた加速度計 (AS-3) によると、構造物の固有振動数の 1.7cps で共振し、その後は振動台の加速度を増加させ、地盤の振動がはげしくなっても、構造物の加速度は大きくならない (図4 参照)。
- (2) 杭の曲げ応力は列に無関係であることが、S-33, S-23, S-13 の測定結果から結論される。
- (3) 構造物が共振しているときは、杭の上端から下端に行くにつれて、杭の曲げ応力は減少しており、その分布は、杭の頂部を水平に静的に引張ったときの応力分布とほぼ同一である。このことは、構造物が共振しているときは、杭の周囲の地盤は杭を支持していることを意味している。振動台の振動数が 5cps までは、杭の曲げ応力は AS-3 と同じ形の共振曲線を示しているが、地盤そのものが共振し、はげしく振動するにつれて、杭の下端の曲げ応力が増加しはじめ、 10cps では杭の曲げ応力の最大値は同じ値となる。しかし S-32 と S-33, S-31 とは逆位相になっており、周囲の地盤が杭を押している、あたかも両端固定のはりに分布荷重が載荷されたときのような応力分布を示す。

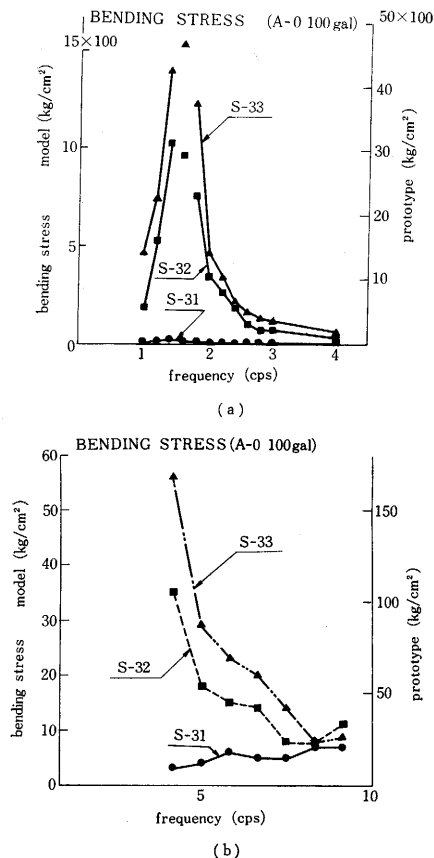


図5 曲げ応力と周期との関係

(4) 構造物の底に存在する振動時のモーメントは杭の曲げモーメントと同時に杭群がそれに抵抗するので、1列に3本ある杭の両側は大きい軸力を受け、真中の杭にはそれほどの軸力は作用していないことを図6は示している。

以上の実験においては、構造物の固有振動数は1.7cpsであり、地盤のそれは12~13cpsであると考えられ、両者の間に相当に差があったので、構造物の共振状態と地盤の共振状態とが完全に分離された実験になった。その結果、杭に及ぼす地盤の影響が明確に把握され、ある場合には地盤は杭を支持するが、他の場合には杭を押す

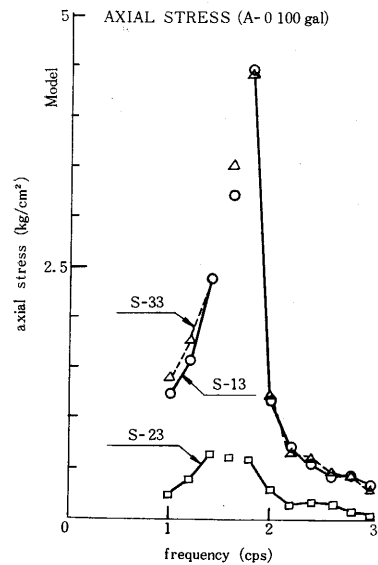


図6 杭の軸力

現象が明らかになった。しかし両者の振動数が接近している状態ではいかなる挙動を示すかは問題であり、また工学上も重要であったので、人工地盤の配合を変化させ、異なった地盤、特に地盤の固有振動数と構造物のそれとが接近したところで実験を行なうことを計画し、地盤の配合を砂と油との比が7.5:2.5とし、地盤の強度を低下させてみた。その結果は強度は低下するが、せん断波の速度は増加した地盤ができてしまい、地盤の固有振動数があがり、10 cps までの実験では地盤の振幅の増大はほとんどみられなくなった。

地盤のせん断波の速度が早くなった状態で、振動台の加速度を約400 gal にあげて振動試験をした。振動台の周期は約0.4秒で、構造物の共振周期よりは早い周期で振動させたところ、杭の上部の固定端付近に亀裂が発生し、振動中4~5 mm の間隙があくのが観察された。応力分布および杭の破壊から杭の頂部の構造については十分注意することが重要であると考えられる。

4. 静的載荷試験と振動試験

一般に杭の理論では、地盤を一種のパネと考えて、パネで支えられるはりとして計算するのが普通であり、振

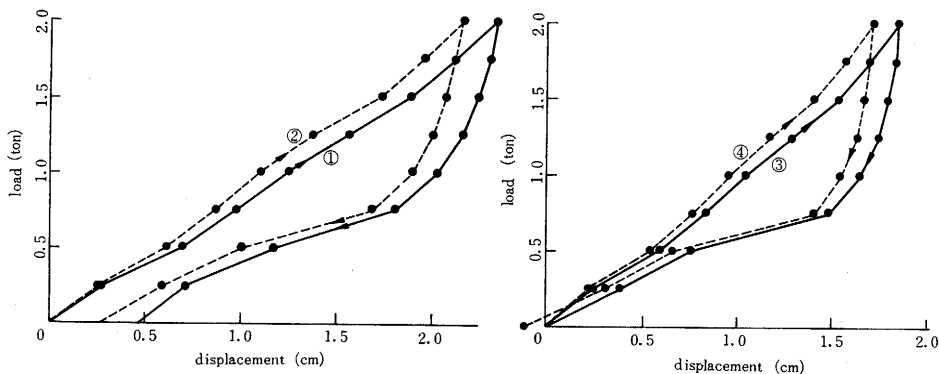


図7 静的試験の荷重変形曲線

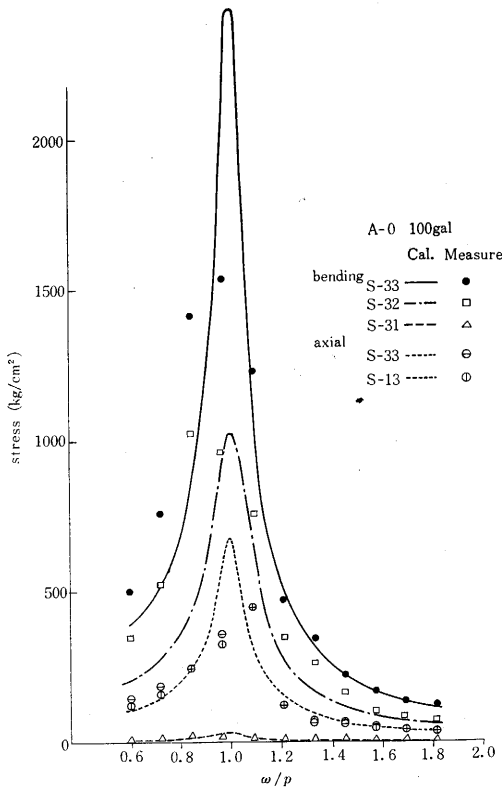


図8 共振曲線

動周期の計算においても同じ考え方が用いられている。バネの強さ、受圧面積などには未解決の問題が多いので、杭基礎をもつ構造物の振動試験においても、静的試験におけるバネの特性を求め、その値を動的試験に拡張して用いた場合を動的実験値と比較した。

静的試験では、コンクリートブロックをジャッキで押し、水平力と変位との関係を調べた。水平荷重とブロックの変位との関係を図7に示す。図7の荷重変位曲線によると荷重が増加する場合と、減少する場合とで異なる特性を示しているが、動的な場合は荷重の増加する場合に近いものと考え、荷重変位曲線のこう配で、地盤のバネ常数を決めた。地盤のバネ特性は地表浅い所では弱く、深くなるに従って強くなる傾向をもっているので、地盤のバネ常数 k を求めるときには、第1近似として地層の深さに比例してバネが強くなるものと仮定した。この結果、杭の下端で $k=0.7 \text{ kg/cm}^3$ なる値を得た。

振動試験における杭の曲げ応力と周期との関係を、静的試験からえた地盤のバネ常数を用いた値と比較したが、図8である。地盤の特性は弾性とは異なっていること、およびバネ常数の分布の仮定などに、実物の性質といくらかの誤差があると思われるので、実験値と計算値の完全な一致は期待できないが、比較的よい一致を図8に示していると思われる。

5. 地震時挙動の理論的解析

電子計算機の進歩により時間的に変化する複雑な入力に対して、構造物の特性が弾塑性を示す場合の応答計算が可能になった。その結果建物、橋梁などの地震時の変

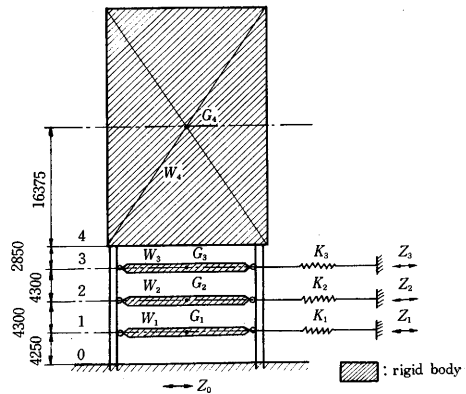


図9 計算に用いたモデル

位、応力などが計算され、その結果を利用して超高層ビル、長大橋梁の設計が行なわれるようになった。建物、橋梁などで従来行なわれてきた計算では、下端は固定、あるいは単純な支持条件を仮定し、そこから地震のエネルギーが入ってくるとしているが、杭基礎をもつ構造物で、構造物自身は剛体に近い場合には、地震のエネルギーは杭の下端のみから供給されるとは限らず、杭の周囲の地盤からもエネルギーが入ってくるのではないかと考えられる。

理論的解析に用いるモデルは図9に示すごとくであって、杭の間にある土は杭と一しょに振動すると考え、杭の質量がそれだけ増加したものとした。杭を3個の質点にわけ、質量は3質点に集中して作用し、地盤のバネも、3質点に不連続的に作用するものとした。強制振動の入力は杭の下端および側面から入ってくるとした。杭の側面からの入力、杭がないとしたときの地盤の変位と杭の振動時の変位との差にバネ常数を乗じたものと考えた。

硬い層の上に軟弱層があり、杭は軟弱層を通して下の硬い層に固定されているとすると、硬い層からの地震波(振幅を A_0 とする)は軟弱層に入ったとき振幅は A_1 になるが、この波が地表面で反射して A_2 、さらに下の硬い層であるものは透過し、あるものは反射して A_3 となる。しかして、軟弱層および硬い層のせん断波の速度と密度をそれぞれ v_1, ρ_1, v_2, ρ_2 とすると、 $A_0 \sim A_3$ との間には波の反射屈折の理論から

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{2}{1+\alpha}, \frac{A_2}{A_1} = 1, \frac{A_3}{A_2} = -\frac{1-\alpha}{1+\alpha} \quad \text{ただし} \quad \alpha = \frac{\rho_1 v_1}{\rho_2 v_2}$$

の関係のあることが知られている。

いま硬い層の地震波が $\phi(t)$ であるとする、軟弱層の下面から d_i なる点(軟弱層の厚さは d とする)の加速度 $a_i(t)$ は上の反射屈折をくりかえす結果、次の式であらわされる。

$$a_i(t) = \frac{2}{1+\alpha} \left[\phi \left(t - \frac{d_i}{v_1} \right) + \phi \left(t - \frac{1}{v_1} (2d - d_i) \right) \right] - \frac{2(1-\alpha)}{(1+\alpha)^2} \left[\phi \left(t - \frac{1}{v_1} (2d + d_i) \right) + \phi \left(t - \frac{1}{v_1} (4d - d_i) \right) \right] + \dots + \frac{2(-1+\alpha)^k}{(1+\alpha)^{k+1}} \left[\phi \left(t - \frac{1}{v_1} (2kd + d_i) \right) \right]$$

$$+\phi\left\{t-\frac{1}{v_1}(2kd+2d-d_i)\right\}\Bigg\}+\cdots$$

上式の i 点の加速度と、杭の下端の加速度とが入力の加速度となる。振動台におけるモデルの実験値と理論値の比較を行ない、しかるのち、地震波をうける構造物の応答加速度、応答応力を求めて、設計の資料とすべきであると考えている。現在までのところ、地震波としては El Centro および Taft の地震記録波形による応答計算は終了したが、実験値との比較が未定であるので、この稿には記述できなかった。

6. 結 語

大型振動台を用いての最初の実験について序報とでもいふべきものを述べたが最大振幅が 5 cm であることは当初の目標を下まわるものであったし、波形がバネとの共振状態に近い周波数以外では正しい正弦波形とはいえない点もあるが、加速度は 400 gal 以上にあげられるので、土と構造物との相互作用、土構造物の耐震実験を意欲的に実施して有益な結果を得たいと考えている。両端の壁よりの波の反射も現在のところ、壁面に設けたクッションで防がれて、砂箱中の加速度分布については良好な結果を得た。

しかしながら、地盤を形成する材料、配合などについては相似律上考えなければならない点が多くあることが判明した。すなわち、人工地盤の強度は相似律を満足させやすいが、その地盤のせん断波の速度については、その測定技術とともに、人工地盤を形成する材料が研究されなければならないであろう。

杭基礎をもつ構造物の振動試験においては、杭の周辺の土の杭に及ぼす作用に二つあり、一つは杭を支持するものであり、他は杭を押し、杭に曲げ応力を発生させるものであることが本実験により明らかにされたわけである。本稿を終えるにあたって、この大型振動台の設置についてお骨折いただいた岡本前所長はじめ関係各位に深甚な謝意を表する次第である。(1968 年 2 月 6 日受理)

文 献

- 1) 久保慶三郎：土木構造物の下部の耐震設計 p. 323~327, Proc. of Japan National Symposium on Earthquake Eng (1962)
- 2) 運輸省港湾技術研究所, 八幡製鉄 KK: H パイルの水平抵抗に関する研究 (1963).
- 3) 松尾春雄：擁壁に作用する地震時土圧の実験, 土木学会誌 27 巻 2 号 (1941).

正 誤 表 (3月号)

| ページ | 段 | 行 | 種 別 | 正 | 誤 |
|-----|---|------|--------|----------------------------------|----------------------------------|
| 2 | 右 | | 写真 1 | マクロ組織 | マイクロ組織 |
| 4 | 左 | 下 9 | 本 文 | 微細化されている | 微細化されいる |
| 11 | 右 | 上 16 | 本 文 | 2 とい | 2 いと |
| 12 | 左 | 下 1 | 式 (14) | $\alpha_2 = \frac{nX^{2+}}{n} =$ | $\alpha_2 = \frac{nX^{2+}}{n} =$ |
| 12 | 右 | 下 10 | 本 文 | $n_{N_2^+} = 0$ | $n_{N^{2+}} = 0$ |
| 13 | 左 | 上 3 | 本 文 | n_{N_2} | n_{N^2} |
| 16 | 左 | | 図 4 | 100 150 (横軸目盛) | 150 150 |
| 19 | 右 | 上 19 | 本 文 | $\rightleftharpoons 2 AlCl_3$ | $\rightleftharpoons AlCl_3$ |
| 20 | 左 | | 写真 6A. | 反応開始直後 | 反応開始後 |
| 21 | 左 | 下 3 | 本 文 | 冶金反応への応用の項 | 冶金反応への反応の項 |
| 37 | 右 | | 図 6 | モリブデン+グリース | モリブデン+グリーン |

(2 月 号)

| | | | | | |
|----|---|--------|-----|-----|-----|
| 3 | 左 | 上 7, 8 | 本 文 | 専 門 | 専 問 |
| 13 | 左 | 下 11 | 本 文 | 除染法 | 除染性 |