

構造物基礎の水平復元力特性に関する実験的研究

後 藤 尙 男・吉 原 進
北 浦 勝・太 田 昭 宏

EXPERIMENTAL STUDY ON THE HORIZONTAL RESTORING FORCE ACTING ON SUBSTRUCTURES

By Hisao GOTO, Susumu YOSHIHARA,
Masaru KITaura and Akihiro Ota

Synopsis

In this study, the horizontal restoring force acting on substructures surrounded by surface layers was investigated by laboratory experiments. The surface layers used in the experiments were a dense dry sand layer and a clay layer. These experimental studies have clarified some restoring force characteristics particular to dry sand layers and clay layers.

In order to apply these experimental results to earthquake-resistant design, the restoring force characteristics have been represented by an empirical formula, and discussions have been made on the appropriateness of this idealization by means of the frequency response curve for these vibrational systems.

1. 結 言

一般に土木構造物の地震時の挙動を推定し、これを耐震設計に発展・適用させるには、その土木構造物の動特性を精度よく推定しなければならない。しかるに地盤中に基礎を有するような土木構造物においては、その振動時の挙動に関与する物理諸量、すなわち質量、減衰係数、ばね定数などのそれぞれが適確に把握されているとはいいがたく、いきおいその動特性ならびに地震時の挙動の推定は不十分なものとならざるを得ない。現在および現在までにそれらを適確に把握し、評価するための研究は数多く行なわれてきたが、複雑な地盤がからんでいることもあって必ずしも十分に満足のいく結果には至っていないようである。

本研究では復元力項（減衰力も一部含む）について、実験的な解析の試みを行なったものであり、著者らの一部はすでに乾燥砂を用いた実験の一部を取りまとめて発表した¹⁾、その後粘性土をも用いた実験を行なったので、ここにその結果と先の結果を合わせ取りまとめた。

先の研究¹⁾で得た成果を要約するとつぎのとおりである。

- 1) 乾燥砂中にある構造物基礎の水平復元力は頂部集中加力あるいは構造物基礎表面に働く振動土圧でおおむね評価できる。
- 2) 乾燥砂中にある構造物基礎の水平復元力は、まさつの効いたスリップ型に近い履歴曲線で若干ばね硬化型でもある。一方、履歴曲線の最大点曲線は直線状あるいは次第に軟化する傾向にある。
- 3) 耐震工学的見地からは、振幅漸変加振による実験が重要である。
- 4) 乾燥砂中にある構造物基礎の水平復元力は振動数の連続的な関数の形で表わされよう。
- 5) 乾燥砂中にある円形断面基礎の水平復元力特性は、矩形断面基礎のそれと大差ないが、幾分ばね硬化の傾向が大きいようである。

このような成果をもとにして、本報告においては粘性土中の構造物基礎の水平復元力特性を同様な手法で求めると同時にいわゆる加振実験を乾燥砂の場合にも行ない、実験法による差異について検討を加え、かつ乾燥砂および粘性土における差異を検討することに重点を置いた。また得られた水平復元力特性を耐震計算、耐震設計に適用するには、それを何らかの形で数式に表示しておいた方が都合がよいので、この模式表示も合わせ行なった。しかる後にこれらの模式化された復元力曲線を用いて周波数応答に関する若干の数値計算を行ない、その模式化の妥当性を検討した。

2. 実験装置および方法

先の報告でも述べたとおり、復元力を計測することは非常に困難で、現在までにいくつかの方法が採られてきたが、それらは必ずしも満足できるものではない。そのなかでわれわれは構造物基礎模型に働く力を直接計測すること、および構造物基礎模型の表面に働く振動土圧を計測して復元力を間接的に評価すること、あるいは構造物基礎模型の応答加速度より復元力を評価すること等を試みた。そして数種類の乾燥砂を用いた実験により、ある程度の妥当性およびそれらの方法に内在する問題点を指摘した。

ここでも前回と全く同様の手法を用いて粘性土中に根入された構造物基礎模型の水平復元力を求めようとしたが、乾燥砂のように粘着力のほとんどないものに用いた手法が粘性土にも同様に適用できるか、あるいは適用できるとすればそれらにはどのような差異があるのかを検討した。また同時に従来から行なわれている方法である²⁾が、土槽全体を加振することによって構造物基礎模型を加振し、その応答加速度(絶対加速度)から復元力を求め、それとさきの加力実験による結果との比較を行なおうとした。

Fig. 1 に実験装置の概略を示した。このうち (a) はコンクリート床上に置かれた土槽中の構造物基礎模型にロードセル (L) を介して隣接する振動台 (S. T.) より任意の振動数の強制変位を与えて、模型に働く地盤からの反力(復元力)を頂部集中力の形で計測、評価しようとするものである。振動台の強制変位は約 0.005 Hz (周期約 200 sec) から 10 Hz までの振動数で与えた。しかしこの場合ロードセルにより計測される頂部集中力(復元力)の中には構造物基礎模型の慣性力、減衰力も含まれていること、とくにこれらは振動数が高くなるにつれて大きな影響力を持つであろうこと、さらに地盤自身は加振されず大部分が静止していて慣性力を持たないので、必ずしも地震時の現象を再現しているとはいいたくないというような問題がある。そこで同図 (b) に示すように、土槽を振動台上に設置して地盤全体を加振し、構造物基礎模型の頂部をロードセルを介して固定すれば、この模型に働く力関係は (a) の場合と同様になるから地盤の慣性力の有無の影響を検討することができる。ここではこの両者による実験を便宜上加振実験と呼ぶことにする。

つぎに同図 (c) は、構造物基礎模型頂部に小型起振器を取り付けて加振する場合であり、(d) は構造物基礎模型頂部に重錘を取り付け地盤全体を振動台上で加振し、地震時に近い現象を再現しようとするものである。しかるにこれらの場合、直接復元力を得ることはできないので模型の応答加速度および模型根入部の振動土圧を計測して、間接的に復元力を求めた。これらの実験を便宜上加振実験と呼ぶ。

実験に使用した模型は Fig. 2 に示すような矩型断面模型で、その底部はヒンジとし、模型の運動を回転のみの 1 自由度に限定した。これは現象を単純化するためであって、次の研究段階ではこのヒンジを取り去り 2 自由度とすべきものである。また模型の表面には、振動土圧を計測するために、片側に小型土圧計を装置したメタクリル酸樹脂板をアルダイトで接着した。この模型の上部は加力実験においては小型起振器(最大起振力約 100 kg, 自重約 6 kg)あるいは重錘(重量 10 kg あるいは 6 kg)を剛結した。この模型は鋼製板で、その重量は 6.5 kg, 底面ヒンジまわりの慣性モーメントは約 2.3×10^6 g-cm-sec² である。

模型地盤の材料には、滋賀県野洲川産の川砂で 2mm フルイを通過した乾燥砂と、京都市伏見産の粉末粘土を約 40% の含水比で練り混ぜたものを用いた。それらの粒径加積曲線は Fig. 3 のとおりである。なおこの図には同時に豊浦、相馬の各標準砂の粒径加積曲線をも示した。模型を土槽の所定位置に設置してヒンジ部分をウレタンフォームでおおった後、砂あるいは粘土の層を作った。まず砂地盤の場合は所定より若干

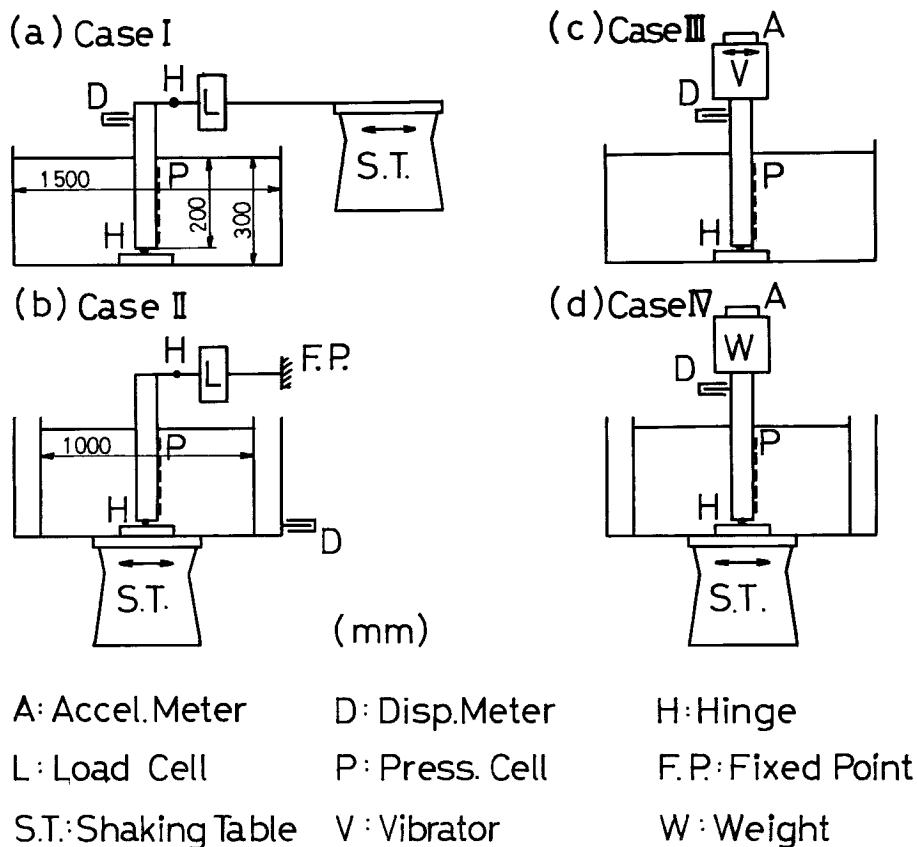


Fig. 1 An outlines of experiments.

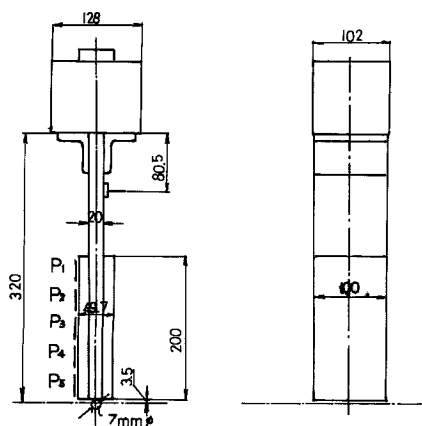


Fig. 2 Profile of model.

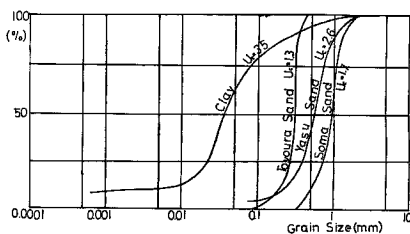


Fig. 3 Grain-size distribution curves.

多い目に砂を投入し、加力実験に用いるときにはコンクリート締め固め用の棒状バイブレータを砂中に挿入して均等に十分締め固め、模型の根入長が 200 mm となるように表面を仕上げた。この締め固めに要した時間は合計 1 時間弱であった。一方加振実験における砂槽の作り方は、砂を所定より多い目に投入し、振動台によって土槽全体を振動数 1500 cpm, 全振幅 0.5 mm で 30 分間加振して締め固め、模型の根入長を 200 mm とした。他方粘土地盤の場合は、粉末粘土を約 40% の含水比で十分練り上げた後、これをコブシ大の大きさにして、土槽の中に 2 m 程度の高さから全力投入し、厚さ 100 mm ごとに手で十分突き固め、これを繰り返して所定の根入長より若干厚い目の粘土層を作った。これを含水比の変動を防ぐためにビニールカバーでおおって 1 週間以上放置した後、実験直前にその表面を仕上げ根入長を 200 mm とした。実験後この粘土層から適宜数個所の粘土試料を取り出し、その含水比を計測したところ大きなバラツキはなく、その平均値は 41.9% であった。

使用した計測器具類は、模型と地盤の相対変位を計測する変位計(日本測器製、可動コア型振動計, 508-A, 最大 ± 5 mm), 模型に働く力を計測するロードセル(共和電業製, LU-50KA, 最大 ± 50 kg), 模型に働く振動土圧を計測する小型土圧計(共和電業製, BE-2KC, 最大 ± 2 kg/cm²), 模型の応答加速度を計測する加速度計(新興通信工業製、非接着型加速度計, UA-5G, 最大 ± 5 G)である。これらの出力を適当に増幅し、ペン書きレコーダー(渡辺測器製, WTR-211 型)に記録すると同時に、ブラウン管式オシロスコープ(松下電子製, VP-541A)の Y 軸に力、振動土圧あるいは応答加速度を、X 軸に変位をインプットして、それらの履歴曲線を直接描かせ、カメラによって撮影記録した。

土槽内に設置された模型の加力あるいは加振は、松平式 UBC-10A 型の振動台によって行なった。まず先に述べた従来の静的実験とみなせるようなとくに低い振動数で加力するときは、振動台の変位振幅を適当に設定した後、所定の振動数(周期)が得られるように振動台の駆動主軸の回転を手動で適宜コントロールした。さらに変位振幅を適当に設定し、任意の振動数で加力する定常正弦波加力と、一定振動数に対して変位振幅を一定レベルまで連続的に上昇あるいは下降させる振幅漸変加力(過渡的正弦波加力)とを行なった。また加振実験においては、応答加速度あるいは入力加速度を一定として、加振振動数を順次変化させる方法と、振幅漸変加振とを行なった。さらに周波数応答曲線をうるために、変位振幅を適当に設定し、加振振動数を約 30 Hz まで連続的に上昇させ、あるいは約 30 Hz より下降させるいわゆる Sweep Test を行なった。

3. 実験結果とその考察

2 で述べたように模型地盤中に根入された構造物基礎模型に強制変位を加えたときの地盤の反力(復元力)、その模型表面に働く振動的圧力、あるいはその模型を地盤ごと加振したときの模型の応答加速度等に関する実験結果あるいはそれらの相互の関係を述べ、それらに関する考察を加える。ここでは粘土地盤を用いた結果との比較を行なう意味で、乾燥砂による結果の一部を再び引用することにする。

Fig. 4 は加振実験の記録例であり、乾燥砂の場合と粘土の場合を対比して示した。これによると振動土圧波形 $P_1 \sim P_5$ において顕著な差異が現われている。すなわち乾燥砂の場合には、加力実験においても見られたように、この加振実験においても引張力はほとんど生じていず、いわゆる受働的な圧力のみが現われているのに対して、粘土では引張力も圧縮力と同程度の値が生じており、粘土地盤では粘着力が大きいことを示している。またこの実験の範囲では、乾燥砂の剛度に比し粘土の剛度は非常に小さいことがわかる。一方、先の報告¹⁾にも見たように乾燥砂の加力実験における頂部集中力とこの図に示した加振実験における応答加速度 A_m とを対比すれば、ほぼ同様の波形を示しており、それらの履歴曲線が互いに似た形を持つであろうことが予想される。このことは粘土の場合にも同様にいえる。

Fig. 5 は構造物基礎模型に働く振動土圧の鉛直方向の分布を示すもので、分布形状は地盤の種類、実験方法でかなり異なることがわかる。すなわちこれらの図より、乾燥砂の場合は振動土圧の深さ方向の分布が三角形状であるが、粘土の場合は必ずしも三角分布とはいえず、地表面近くでもかなりの振動土圧が生じて

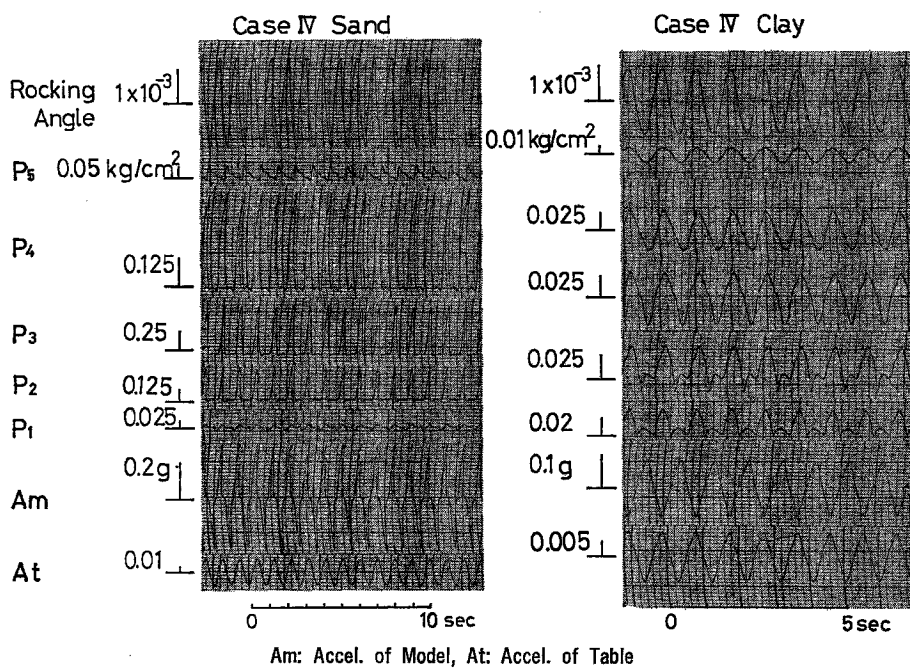


Fig. 4 Examples of records.

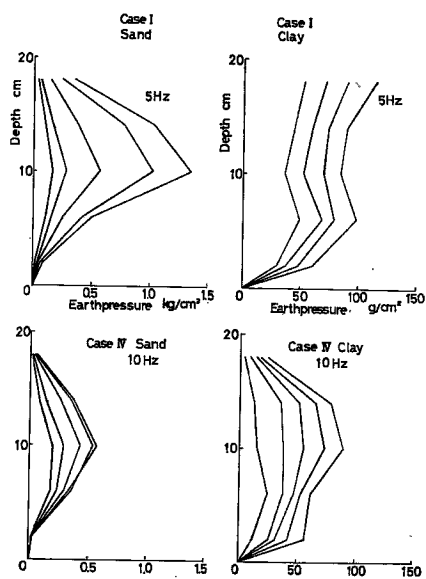


Fig. 5 Vertical distributions of earthpressure.

いることがうかがえよう。これは砂地盤あるいは粘土地盤の深さ方向の剛度分布に大きく関係するものであって、前者では逆三角形の、後者では一様状の分布であることが多いといわれていることと、模型底面がヒンジ固定であるから模型の変位が地表面で最大、その底部で0となることを考慮すれば、このような振動土圧分布となることが理解できる。また粘土の場合加力実験と加振実験とで少し振動土圧分布が異なっている。この差異は地盤が加振されたことによる影響であるというよりむしろ地盤の違い（加振実験に用いた粘土地盤は、実験の都合上、加力実験に用いた粘土を取り出し、これを再度使用したので加力実験で用いた粘土地盤と必ずしも同一であるとはいえない）か、あるいは粘土の場合は実験を繰り返すにつれて、地表近くの粘土は模型と離れてしまうための影響のいずれかであろうと考えられる。したがって振動土圧の分布形状のみを詳細に検討するには以上のような問題点を十分考慮しておく必要があるが、今回の実験では最終的には振動土圧と頂部集中力の力の釣合を考えているので、この点の影響は小さいとみなしてよからう。

つぎにこの振動土圧と模型の回転角（以後これを基礎体回転角という）の関係（いわゆる力-変位曲線）を図示したのが Fig. 6 である。この図には加振実験の結果が示されているが、他の場合もほぼ同様の傾向を持っている。乾燥砂、粘土とも振動土圧は基礎体回転角に対してほぼ軟化型の非線形特性を持っているが一定回転角以上では線形に近いものもある。また深さ方向の測定点によりかなり様子が異なっているともいえよう。さらにこの図より、振動土圧の鉛直方向の分布形状は不変のものでなく、基礎体回転角とともに変動してゆくのがわかる。

ここに見たように振動土圧を個々の位置での挙動として捕えるのではなく、いまこれを構造物基礎模型に働く抵抗力として評価するためには、模型のヒンジまわりのモーメントとして捕えた方が適切であろう。加振実験の場合を図示したのが Fig. 7 である。この図では加振振動数をパラメーターとして示したが、いずれの加振振動数においても、また乾燥砂、粘土ともに全く同様の傾向を持ち、小変位時（基礎体回転角が小さいとき）には、曲線のこう配が徐々に小さくなる軟化型の曲線であるが、それが大きくなると直線状に変化しているのがわかる。さらに巨視的に見れば bi-linear 型に近いとみなしてよさそうである。一方加振振動数が大きくなると直線部分が大きくなり、振動土圧モーメントすなわち見掛け上の地盤の剛度も大きくなることがわかる。また先に見たように乾燥砂と粘土とはモーメントの絶対値が非常に異なっている。なお加力実験の結果は、粘土については、ほとんど Fig. 7 と同じであるが、乾燥砂については先に報告した¹⁾ように小変位時には直線、以後軟化型の曲線となつてかなり様子が異なっていた。加振時に砂と粘土が似た挙

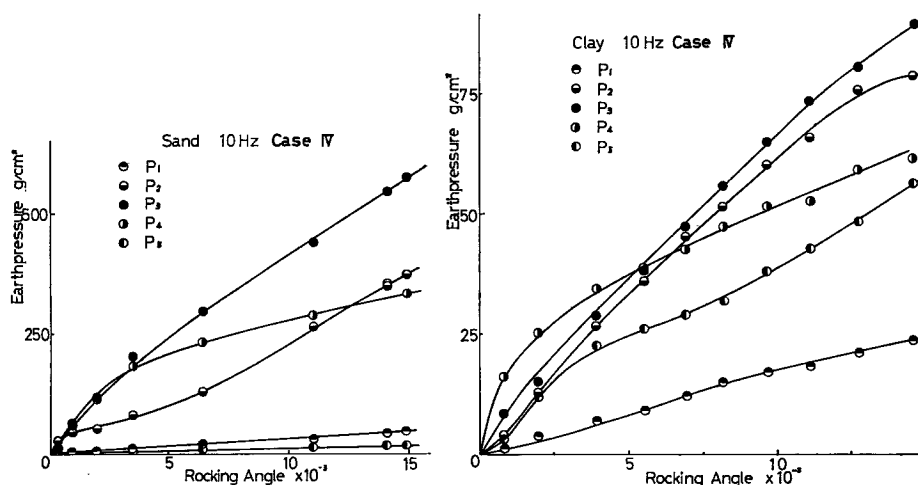


Fig. 6 Relation between earthpressure and rocking angle of model.

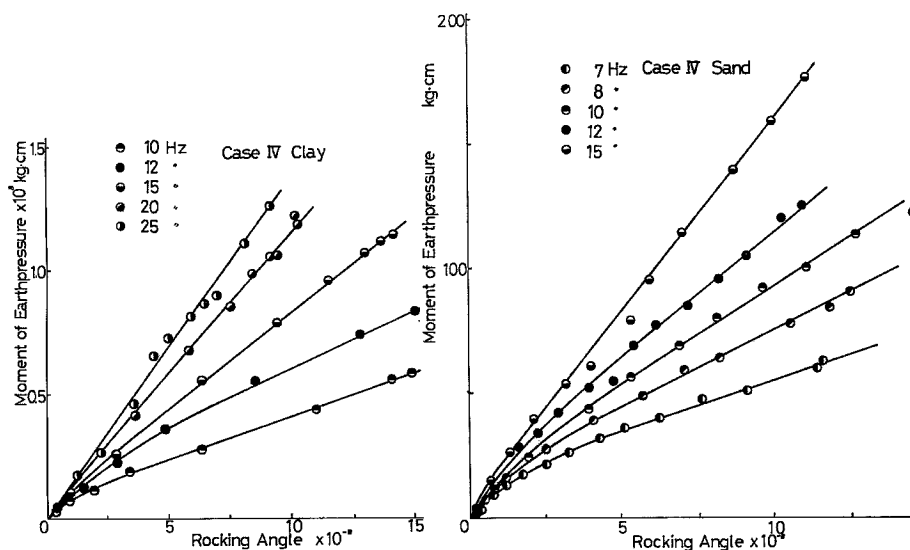


Fig. 7 Relation between moments of earthpressure and rocking angle of model.

動を示すのは興味深い。

Fig. 7 に見たように、乾燥砂あるいは粘土の剛度が加振振動数に関係することがわかったので、この関係を一層明確にするために、Fig. 8 にそれらの関係を示した。乾燥砂の場合はすでに報告した¹⁾ とおり、振動数とともに剛度が単調に増加することが認められたが、粘土の場合は同図 (b) のように乾燥砂と同様に単調増加するもの、あるいは (a) のように 2~3 Hz の振動数のところでピークを持つものもある。さらに粘

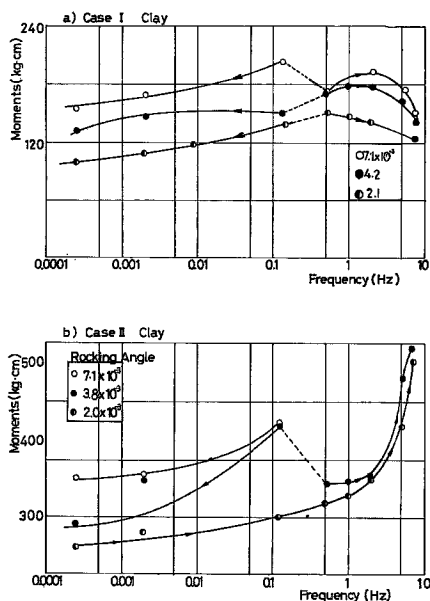


Fig. 8 Relation between moments and frequency.

土の場合は実験の順序が大きな要素であることがわかる。なすわち **Fig. 8** における矢印は実験の順序を示すもので、破線の部分が前後に連続的につながらず。これは先に述べたように粘土の実験において見られた、模型と粘土層の間に生ずる空隙のために見掛上剛度が変化したのであろうと解される。

このように今回までの実験の範囲では、乾燥砂の剛度は見掛上加振振動数とともにほぼ単調に増大するに反し、粘土の剛度は先に述べたように不明確な部分であるが一部低下するものもある。一般に周囲を境界で取り囲まれた箱の中に、非弾性体を含めた何らかの媒体を充てんしたとき、これは一つの振動系を構成し、たとえば固有振動という形で、その境界の影響が現われてくる。今回の実験のうち **Case I** あるいは **Case II** の場合は、変位強制型の実験であり砂層あるいは粘土層中の模型を揺らせることによって、振動系の固有振動を引き起すことが十分考えられる。本実験に使用した粘土地盤は砂地盤よりはるかに軟らかいことは度々見たとおりであり、**Fig. 8 (a)** の 2~3Hz のピークはその粘土層の第 1 次の固有振動数であるとすれば、これより剛度の大きい砂においてはまだ砂層の固有振動数が現われていないのではないかという可能性はかなり強い。今回の実験では、加力実験は 10Hz までしか行なえず、実験結果に占める境界の影響を定量的に評価できなかったが、もっと高振動数域での実験を行ない土圧等の振動数特性を正しく把握できれば、その中に含まれるであろう境界の影響を正しく評価することができよう。同時に実験結果からこれを除き、構造物基礎模型に及ぼす地盤の効果を正しく捕えることが可能となる見込みが強い。

以上振動土圧についていくつかの検討を加えたが、つぎに振動土圧と頂部集中力（復元力）との関係について検討を行なう。乾燥砂と粘土についてこの関係を表わしたのが **Fig. 9** である。同図 (a) によると粘土の場合も乾燥砂¹⁾ におけると同様に振動土圧モーメントは復元力のモーメントと線形比例の傾向にあり、両者の値はほぼ等しいことがわかる。そしてそれらの差は模型の慣性力、模型側面のまさつ、振動土圧の水平方向の分布等を考慮していないためであろうと考えられる。しかし同図 (b) に示したように粘土の **Case II** の場合には一部復元力のモーメントが振動土圧のモーメントよりかなり大きな値を示しているものもあり、粘土の場合振動土圧により復元力を評価する場合には十分注意する必要があることを示している。

つぎに振動土圧、復元力（頂部集中力）あるいは応答加速度と変位（基礎体回転角）を直接ブラウン管式

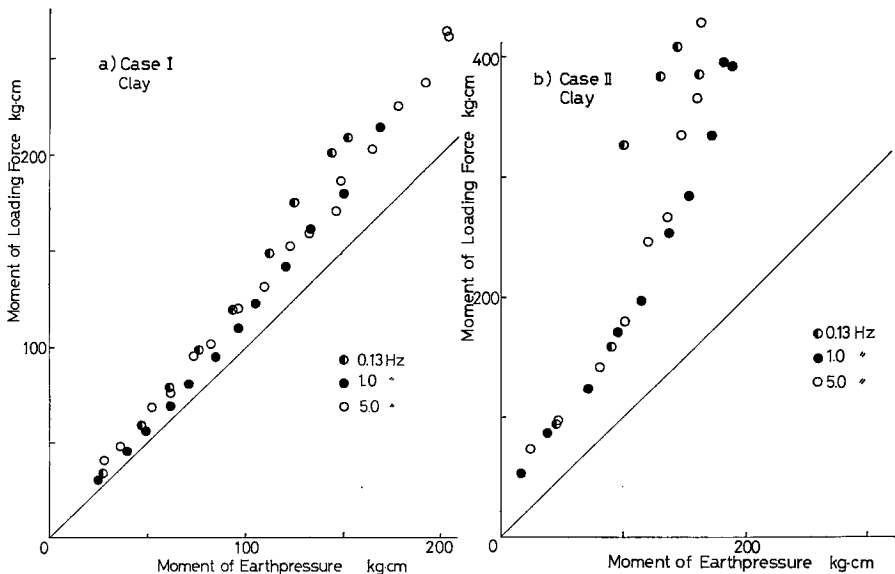


Fig. 9 Relation of moments.

オッシロスコープにインプットして得た写真により、それらの履歴形状について乾燥砂および粘土の違いに重点を置いて検討を加える。Fig. 10 がそれらの代表的なものを一覧したもので、(a)~(j) が Case I, (k), (l) が Case II および (m)~(p) が Case IV による結果である。

まず乾燥砂と粘土における復元力特性の違いについて考察を加えてみると、履歴曲線の形状および履歴曲線の最大点を連ねた曲線（以後これを最大点曲線と呼ぶ）はともにかなり顕著な差異が認められる。すなわち乾燥砂における場合は、その形状がまさつの比較的効いたスリップ型の逆 S 字状であるのに対して、粘土における場合はいわゆるまさつ型であり、スリップはほとんど認められない。これは乾燥砂では、砂粒子間のまさつおよびそれらのかみ合せにより変形に抵抗するものと考えられるから、変形の中立軸付近では変形の繰り返しにより、粒子間の間隙が大きくなって抵抗力が低下したために逆 S 字型になるものと考えられる。これに対して粘土の場合は粒子間の粘着力による抵抗力が大きいから、その粘着力が切れるまでは変形に対してほぼ線形的に抵抗するものと考えられる。一方乾燥砂の最大点曲線を見るとほぼ線形に近く、変位が大きくなるに従い若干軟化する傾向にあるのに反し、粘土では逆に変位の小さいときは軟化型の曲線で、ある値以上の変位に対しては直線状となる。あるいは前述したように bi-linear 型とみなしても大過なからう。また小変位部分のみに注目するために掲げたのが同図 (j) である。これによると、大変位時と同様にやはり履歴を有し、しかもその形状は類似していることがわかる。さらに最大点曲線は、変位が大きくなるにつれて、徐々に軟化してゆく様子がわかる。

つぎに同図 (a) および (e), (b) および (f) はそれぞれ加振振動数のみが異なるものである。このうち乾燥砂については振動数が高くなると幾分中立軸付近のこう配が小さくなること、最大点曲線の軟化の傾向が強くなることおよび履歴曲線の上枝曲線のこう配が徐々に大きくなり一層逆 S 字型に近くなることなどがうかがえるが、粘土の場合はこの程度の振動数の違いではほとんど差異は認められない。そこでさらに振動数の小さいときの粘土の復元力を示したのが同図 (i) である。これは 1 サイクルを 16 ステップとし、5 秒ごとにつぎのステップに移るという方法で求めたもので、1 サイクル（約 80 秒）間露光して得た写真である。この内側の各点を連ねた曲線がいわゆるこの場合の復元力曲線であり、それより外側の部分は粘土の応力緩和の進行中のものであろう。したがって高振動数時にはこの外側の包絡線的な曲線となるはずである。この内側と外側の曲線の形はほぼ同じで、単に曲線のかこむ面積のみが異なるようである。このように粘土ではこの実験の範囲内の振動数程度ではほとんどその影響は受けないが、低振動数域では応力緩和の影響で剛度が見掛上若干異なってくることがわかる。一方乾燥砂では振動数が高くなるにつれて粒子間のかみ合せが緩むので、履歴曲線もその影響を受けるのであろう。

前述のように復元力の絶対値については振動土圧からかなりの精度で評価できることがあるといえたが、つぎに復元力の履歴曲線は振動土圧の履歴曲線といかなる関係にあるかを見るために、振動土圧の履歴曲線を各復元力の履歴曲線の対応個所に示した。この振動土圧の履歴曲線は模型の片側分だけであるので、直接復元力の履歴曲線とは比較できないが、形の大略をつかむことはできる。これによると履歴曲線の形、最大点曲線とも復元力曲線と同様な挙動を示すことがわかる。結局乾燥砂についてすでに報告した¹⁾ように、復元力曲線は振動土圧の履歴曲線からもある程度の推定は可能であることがわかる。

最後に実験法による復元力曲線の差異について若干の考察を述べる。Fig. 10 (k), (l) は粘土の加力実験、Case II の結果であり、(j), (h) の Case I のものとそれぞれ対応するものである。それらを比べると変位レベルが小さいとき (k), (j), はほぼ同様な曲線であることがわかるが、変位レベルが大きくなる (l) と、その様相がかなり異なってくる。すなわち乾燥砂で見られたように、スリップが加わり、逆 S 字型となって履歴曲線の形状が細くなってくる。一方最大点曲線はある変位レベル以上において、Case I では見られなかった軟化の傾向が明瞭に現われている。これは、先にも述べたように、Case II の粘土層が Case I の場合と同一のものでないで簡単に断定できないが、粘土層が加振されることにより、粘土層の抵抗力すなわち粘着力が幾分低下したためでないかとも思われる。なお乾燥砂についても全く同様に Case I の場合より、Case II の

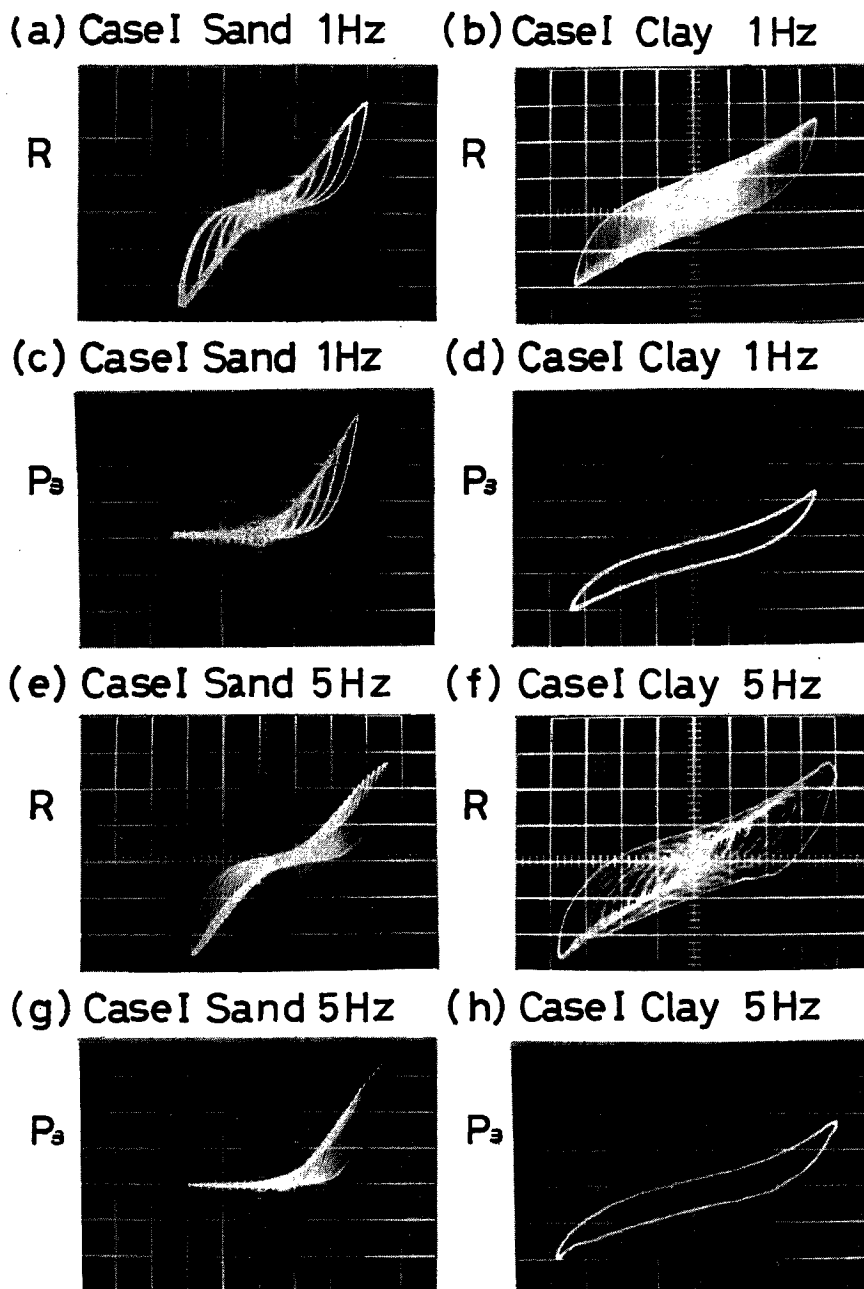
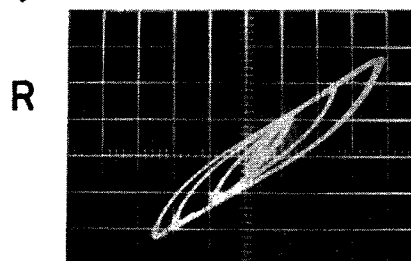
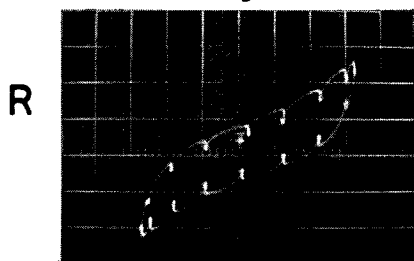
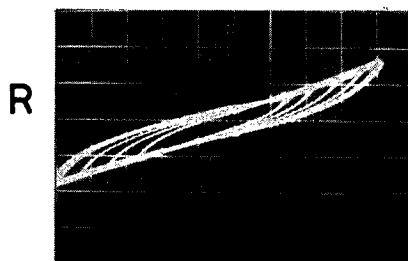


Fig. 10-1 Hysteresis curves of restoring force and earth pressure.

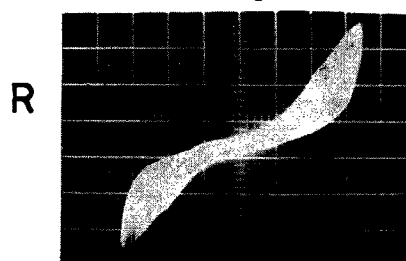
(i) Case I Clay 0.13Hz (j) Case I Clay 1Hz



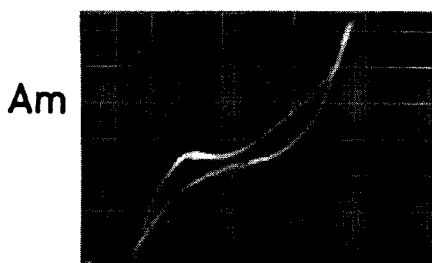
(k) Case II Clay 1Hz



(l) Case II Clay 1Hz



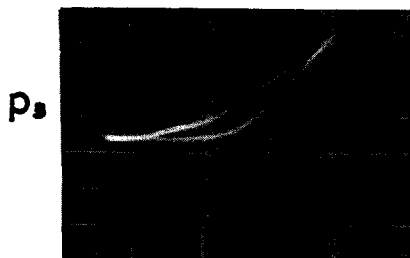
(m) Case IV Sand 8Hz



(n) Case IV Clay 8Hz



(o) Case IV Sand 8Hz



(p) Case IV Clay 8Hz

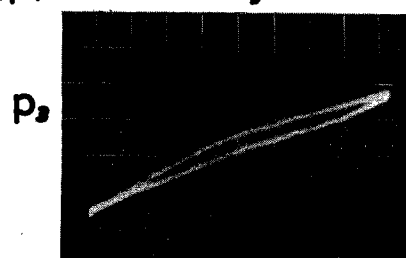


Fig. 10-2 Hysteresis curves of restoring force and earthpressure.

方が軟化の程度が大きいということはすでに報告した¹⁾とおりである。

つぎに同図 (m), (n) は加振実験 Case IV より得られた, 模型頂部の応答加速度の履歴曲線で, それぞれ乾燥砂および粘土の結果である。この履歴曲線と先に見た復元力の履歴曲線, たとえば同図 (a), (b) は乾燥砂, 粘土ともその形状が非常に類似しているといえよう。先の報告でこの方法の長所, 短所を述べておいたが, この程度の加振振動数領域であれば加速度と変位の間には位相差が見られず, 実用上差しつかえないといえよう。なおこの絶対値については構造物の質量を乗ずることによって補正したもの²⁾もあるが, 振動土圧の記録についても先の結果と比較的類似していることから, この振動土圧を用いて補正することも有力な方法であるといえよう。

このように得られた復元力の履歴曲線から, 履歴減衰を等価粘性減衰定数 h_e の形で求め, これと基礎体回転角, 加振振動数の関係を示したのが Fig. 11 である。この図には先の報告に示した豊浦標準砂および

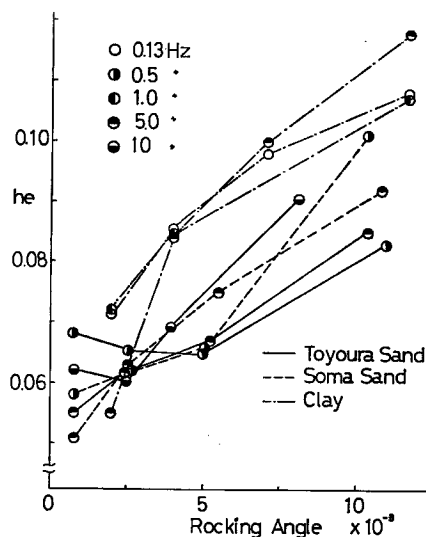


Fig. 11 Hysteresis dampings.

相馬標準砂の結果をも合わせ示した。これによると基礎体回転角 (変位) が大きくなると, すなわち模型を取りまく地盤のひずみが大きくなると, ほぼこれに比例的に h_e が増大すること, また振動数が大きいほど h_e も大きくなる傾向にあることなどがわかる。すなわち模型の変位速度が大きくなると, h_e が大きくなるといえる。一方乾燥砂と粘土の h_e の大小関係を比較すれば, たびたびいわれるように, 乾燥砂の方が粘土より小さく, いわゆる粘性が小さいことを示すものであろうと解される。

4. 復元力曲線の模式化とその計算例

ここでは, 実験より得られた構造物基礎の水平復元力特性の模式化を試み, これを用いて振動解析を行ない, その模式化の妥当性を検討する。

4.1 復元力曲線の模式表示

a) 乾燥砂の場合

先の報告において乾燥砂の水平復元力曲線の模式化を試み, いくつかのパラメーターについて図を掲げておいた。ここにそれらを要約して示せばつぎのようになる。

乾燥砂を用いた実験により 最大点曲線を, 一定の変位 レベルまでは直線 (第1分枝), それ以後はこの直線よりこう配の小さい直線ないし軟化ばね型の曲線 (第2分枝) とすると, 最大点曲線 $k(X/x_0)$ はつぎの

(1) 式を Y/y_0 について解いたものになる。

$$\frac{X}{x_0} = \frac{Y}{y_0} + \alpha \cdot u\left(\left|\frac{Y}{y_0}\right| - 1\right) \cdot \left(\frac{Y}{y_0} - \frac{Y}{y_0} \left/ \left|\frac{Y}{y_0}\right|\right|\right)^r \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 X, Y : 各履歴曲線の最大点の変位と復元力、 x_0, y_0 : 第2分枝が生ずる点の変位と復元力で、いずれも正、 α, r : 第2分枝が第1分枝から離脱する程度を表わす定数で、 α は0または正、 r は正の奇数、 $u(z)$: unit step function, である。

つぎに復元力の履歴曲線 $g(x/X)$ については、まさつの効いたスリップ型、いわゆる逆S字型であるとし、これを Jennings の履歴曲線を参照してつぎの (2) 式のように表わした。

下枝について

$$\left. \begin{aligned} &-(1-r) \leq \frac{x}{X} \leq 1 \text{ のとき,} \\ &\frac{y+(1-r)Y}{(2-r)Y} = \frac{1}{1+\beta} \left[\frac{x+(1-r)X}{(2-r)X} + \beta \left\{ \frac{x+(1-r)X}{(2-r)X} \right\}^s \right] \\ &-1 \leq \frac{x}{X} \leq -(1-r) \text{ のとき, } \frac{y}{Y} = \frac{x}{X} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 x, y : 履歴曲線の変位と復元力、 r : Jennings 型の履歴曲線からの変形量を表わす定数で $0 \leq r \leq 1$, β, s : 履歴曲線のふくらみを表わす定数、 β は0または正、 s は正の奇数、である。

なお上枝については下枝とほぼ同様なので省略する。この (2) 式を y/Y について解いたものを履歴曲線 $g(x/X)$ とすると復元力曲線 $R(x/x_0)$ は

$$R(x/x_0) = k(X/x_0) \cdot g(x/X) \quad \dots\dots\dots (3)$$

で表わすことができる。

b) 粘土の場合

粘土の実験より、最大点曲線は一定の変位レベルまではばね軟下型の曲線 (第1分枝)、それ以後は直線 (第2分枝) でしかも分枝点において曲線のこう配はほぼ等しいといえる。これを模式表示すればつぎのようになろう。

$X/x_0 \leq -1$ のとき (第2分枝), $X/x_0 = n(Y/y_0 + 1) - 1$

$-1 < X/x_0 \leq 0$ のとき (第1分枝), $X/x_0 = (-1)^{n+1}(Y/y_0)^n$

$0 < X/x_0 \leq 1$ のとき (第1分枝), $X/x_0 = (Y/y_0)^n$

$X/x_0 > 1$ のとき (第2分枝), $X/x_0 = n(Y/y_0 - 1) + 1$

これを1つの式に表示すれば (4) 式となり、これを Y/y_0 について解けば粘土の最大点曲線 $k'(X/x_0)$ が得られる。

$$\begin{aligned} \frac{X}{x_0} = & u\left(\left|\frac{Y}{y_0}\right| - 1\right) \cdot \left\{ n\left(\frac{Y}{y_0} - \frac{Y/y_0}{|Y/y_0|}\right) + \frac{Y/y_0}{|Y/y_0|} \right\} \\ & + u\left(1 - \left|\frac{Y}{y_0}\right|\right) \cdot \left\{ (-1)^{n+1} \cdot u\left(-\frac{Y}{y_0}\right) + u\left(\frac{Y}{y_0}\right) \right\} \left(\frac{Y}{y_0}\right)^n \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここに n は第2分枝のこう配を表わし、 $n \geq 1$ なる定数である。

一方履歴曲線の形状については、乾燥砂の場合とかなり異なるように見えるが、Fig. 13 を見ればわかるように (2) 式において $r=0$ とすればかなりの近似度で表現できているのがわかる。

したがって粘土地盤の復元力曲線は (3) 式において、 $k(X/x_0)$ を $k'(X/x_0)$ とすることにより得られることになる。これらを図示すると Fig. 12~Fig. 14 となる。

4.2 数値計算

さきの復元力曲線の模式表示の妥当性を検討するために、模式化された復元力特性を有する振動系の計算結果と実験により得られた結果を対比する。そのためにまずここで用いたモデルを、回転のみの1自由度振動

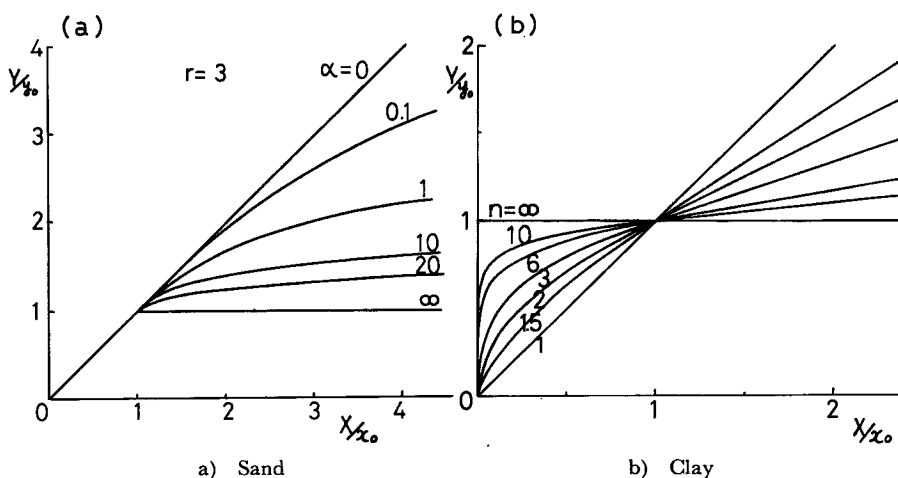


Fig. 12 Modelized maximum lines of hysteresis curve.

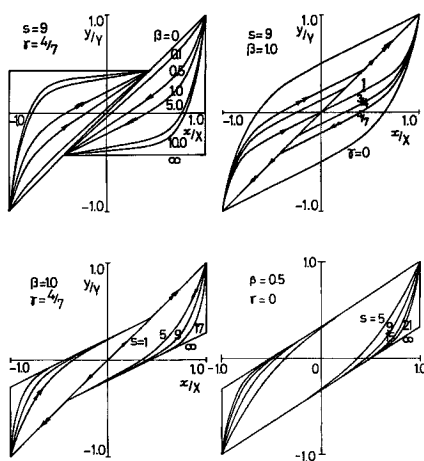


Fig. 13 Modelized hysteresis curve.

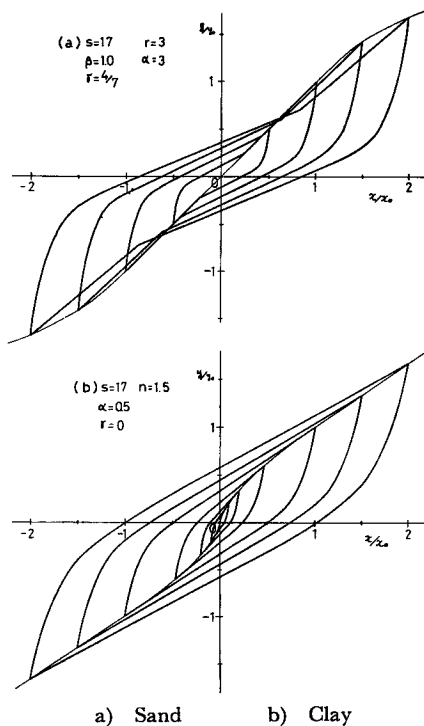


Fig. 14 Modelized restoring force curves.

系として運動方程式を求めると (5) 式ようになる。

$$J_0 \ddot{\varphi} + c_r \dot{\varphi} + J_0 \omega_0^2 \varphi_0 R(\varphi/\varphi_0) = -J_0 \cdot \frac{\ddot{z}}{h_0} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 J_0 : ヒンジまわりの慣性モーメント、 c_r : 減衰係数、 ω_0 : 線形振動時の固有円振動数 $=\sqrt{k_0/J_0}$ 、 k_0 : 規準剛度 $=M_0/\varphi_0$ 、 M_0 : ヒンジまわりの規準復元モーメント、 φ_0 : 規準回転角、 $\ddot{z}$: 地動加速度、 h_0 : 重心点の高さ。

この (5) 式を、T. K. Caughey が復元力が bi-linear のとき定常解を求めた手法³⁾を用いて解析すれば、最終的には

$$(\Phi^3 - \phi_s^2) \eta^4 + (4h^2 \Phi^3 - 2k \Phi G) \eta^3 - 4hkH\Phi\eta + k^2(H^2 + G^2) = 0 \dots\dots\dots (6)$$

なる式によって周波数応答曲線が得られる。

ここに、 Φ : 応答回転角の振幅を φ_0 で除し規準化したもの、 η : 正弦波地震加速度の円振動数 ω を ω_0 で除し規準化したもの、 ϕ_s : 正弦波地動加速度の振幅を $h_0 \cdot \varphi_0 \cdot \omega_0^2$ で除し規準化したもの、 h : 減衰定数 $=c_r/2\sqrt{J_0 k_0}$ 、 G, H : 復元力の履歴曲線 $g(\varphi/\varphi_0 \Phi)$ のみによって決定される値で、次式で定義される。

$$G = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(\cos \theta) \cdot \cos \theta d\theta, \quad H = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(\cos \theta) \cdot \sin \theta d\theta.$$

(6) 式からも明かなように、復元力曲線と模型の諸元が与えられれば、その周波数応答曲線を求めることができる。特に G および H は復元力曲線の形を表わす式 $g(\varphi/\varphi_0 \Phi)$ だけの関数であるので、これらを別に計算しておけば、砂および粘土の場合の周波数応答曲線は最大点曲線を k あるいは k' とすることにより比較的簡単に求められる。

ある特定のパラメーターの群で表わされる振動系の周波数応答曲線を求めたが Fig. 15(a) であり、加振実験により得られた粘土地盤中の模型の周波数応答曲線を示したのが Fig. 15(b) である。この両図を比較してわかるように、振動系のパラメーターを実験結果を参考にして適正に選ぶなら実験から求めた周波数応答と計算結果はかなりよく合うことがわかる。換言するとここで提示した復元力の模式表示がかなり妥当な

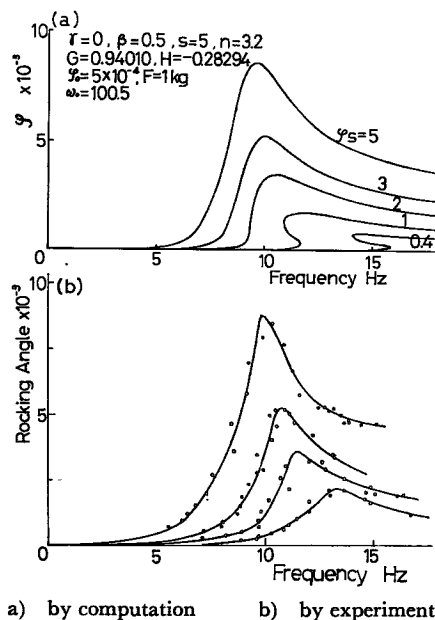


Fig. 15 Frequency response curves.

ものであるといえるであろう。

5. 結 語

本研究において、乾燥砂あるいは粘性土より作られた模型地盤中に根入された構造物基礎模型の水平復元力特性に関する実験を行ない、これより得られた結果について若干の考察を加えることによりいくつかの成果が得られた。それらを要約して列挙すればつぎのようになる。

- (1) 粘性土中に根入された構造物基礎模型の水平復元力特性は、乾燥砂中に根入された場合の水平復元力特性とは、その履歴曲線の形状、最大点曲線の動向ともかなり異なっている。すなわち乾燥砂中の水平復元力はまさつの効いたスリップ型に近い履歴を有し逆 S 字型の履歴曲線で、その最大点曲線は変位が一定レベルまでは直線状に、以後は若干軟化する曲線状の曲線である。一方粘性土中の場合は履歴曲線はいわゆるまさつ型であり、最大点曲線は一定の変位レベルまでは徐々に軟化する曲線であり、以後は直線状に変化する復元力曲線となる。このように地盤中の構造物基礎の水平復元力はこれを一律に論ずることはほとんど不可能であろう。
 - (2) 粘性土中の構造物基礎の水平復元力は振動数の影響はあまり受けないが、本実験程度の振動数領域においては、粘性土の応力緩和の影響を受け、幾分復元力の値が変動することがある。
 - (3) 乾燥砂中の構造物基礎の水平復元力は比較的振動数の影響を受けやすく、復元力の履歴曲線の形状が幾分変化してくる。
 - (4) 構造物基礎に働く振動土圧により復元力を推定することはかなり有力な方法であると思われるが、粘性土中にある場合は、実験技術が困難であるので、十分注意する必要があるであろう。一方加振実験によって求めた構造物基礎の応答加速度の履歴曲線と、いわゆる復元力曲線とはよく類似しており、加速度計の位相が問題とならないときには、この加速度記録を用いて復元力を推定するのも有力な方法となろう。
 - (5) 粘性土中に根入された構造物基礎の履歴減衰は、乾燥砂中にある場合よりも当然大きく、かつまたこれら履歴減衰は模型の変位速度にほぼ比例的に大きくなるようである。
 - (6) 乾燥砂中あるいは粘性土中にある構造物基礎の水平復元力曲線を、それぞれ比較的簡単な (1) 式～(4) 式なる関数で表示した。しかも乾燥砂と粘性土における復元力曲線の模式表示上での差異は最大点曲線のみで、履歴曲線の形状に関しては一つのパラメーターの値を変えるだけである。
 - (7) 模式表示された復元力曲線を用いて計算した周波数応答曲線と、実験より求めた周波数応答曲線とは、パラメーターを適切に選べば、かなりよく似てくることがわかった。したがってここで提示された復元力の模式表示はかなりの有用性と一般性を有しているといえよう。
- 以上のような成果が得られたが、本実験の問題点および今後の課題を簡単に述べればつぎのとおりである。

- (1) 地盤中に根入された構造物基礎の水平復元力を一般的に論ずることは非常に困難である。しかしこの復元力に影響を及ぼす要因としては、地盤の性質がもっとも大きいものであろう。したがって地盤を構成する材料の応力-ひずみの履歴曲線およびその機構を追求すれば、いわゆる復元力曲線を一般的に論ずるための有力な手掛りとなるのではないかと考えられる。
- (2) 今後大型の構造物基礎模型を用いた実地盤での実験がぜひとも必要である。しかしこのとき構造物の変位記録をうることが非常に困難であるので、なんらかの工夫が必要となる。
- (3) 粘性土を用いた実験においては、乾燥砂を用いたとき以上に一様地盤を作ることが困難であること、またその粘土地盤を実験中に状態が変化しないように維持することがむずかしい。

最後に本実験の遂行にあたり絶大な協力を頂いた本学大学院学生宮脇幸治郎君および種々御検討、御援助を頂いた亀田弘行助教授をはじめ当研究室の諸兄に謝意を表するものである。なお本研究は文部省科学研究

費（総合研究A）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 後藤尚男・吉原 進・北浦 勝：乾燥砂中にある 構造物基礎の水平復元力特性に関する実験的研究，土木学会論文報告集投稿中。
- 2) 後藤尚男・土岐憲三・安藤嘉茂・太田昭宏：土一基礎系の動的復元力特性について，昭和 43 年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要，昭 43，1-15。
- 3) Caughey, T. K.: Sinusoidal Excitation of a System with Bi-linear Hysteresis, Journal of Appl. Mech., Vol. 27, 1960, pp. 640-643.