

模型杭基礎の復元力特性に関する オンライン・リアルタイム実験

REAL TIME DYNAMIC TEST ON A MODEL PILE FOUNDATION

伯野元彦*・横山功一**・佐藤安一郎***
By Motohiko Hakuno, Kōichi Yokoyama and Yasuichiro Satō

1. はじめに

過去の震害例を見れば、構造物基礎が構造物の耐震性にとって重要な役割を果たしていることに気付くわけであるが、その基礎の耐震強度となると、まだあまり明らかにされていないといっても過言ではない。

さて、本研究は、そのように重要な構造物基礎の耐震強度を調べる第一歩として、小さな模型杭について、アナログ・コンピューターによるオンライン・リアルタイム動的破壊実験を試みたものである。

この種の研究は、手法としてはすでに著者の一人が、鋼供試体について試みており¹⁾、また、京都大学後藤尚男博士、吉原進氏らは、オンライン・リアルタイム実験ではないが、乾燥砂中の杭について復元力特性を求めている²⁾。また、地震波形などの複雑な外力を用いない正弦波外力実験としては現場実験、室内模型実験については種々扱われている³⁾。

2. 実験方法

実験は、加える外力により次の3種に分けられる。

i) 変位制御実験

これは、上部構造物が非常に柔らかい場合で、杭頂部には地震動は強制変位として作用する。

ii) 力制御実験

これは、上部構造物が地震に対して剛体とみなせるような剛い場合に相当する実験であって、杭頭部には地震が強制力として作用する。

iii) オンライン・リアルタイム実験（ハイブリッド実験）

これは、上部構造物が地震動の持つ振動数領域内

に、その固有振動数を持っている場合に相当するものであって、上部構造は選択共振を行なう。そのとき、杭頭に加えられる強制変位は、実験装置とオンラインで結びつけられたアナログ計算機により計算される。

以上の実験方式を実施するため a) 波形入力部、b) ランダム波形試験機、c) アナログ計算機、d) 模型杭と砂箱を図-1 に示すように結合し、実験装置を試作した。

模型杭としては図-2 に示すように、80 cm × 80 cm × 75 cm の鋼製箱に均等係数 1.2 の豊浦標準砂を入れ、鋼製模型杭（外径 3.2 cm、肉厚 1.8 mm、長さ 84.5 cm、曲げ剛性 $2.94 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$ 、重量 900 g）を鉛直に埋設し、頂部をランダム試験機のピストンとヒンジ結合した。したがって、杭頭自由の状態に加振していることとなる。砂の間げき比は乾燥状態で 0.74、湿潤状態（含水比で 13.4%）で 0.81、（含水比 27.8%）で 0.82

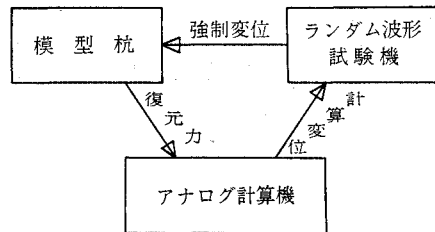


図-1 オンライン・リアルタイム実験のブロック図

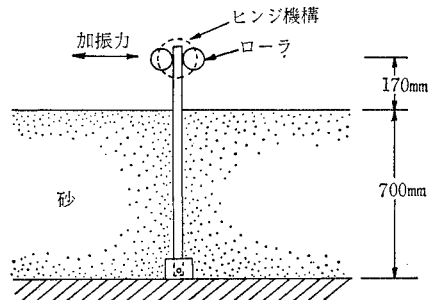
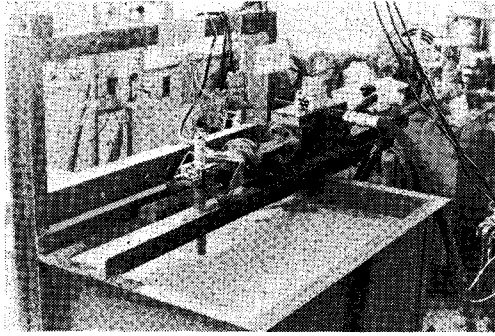
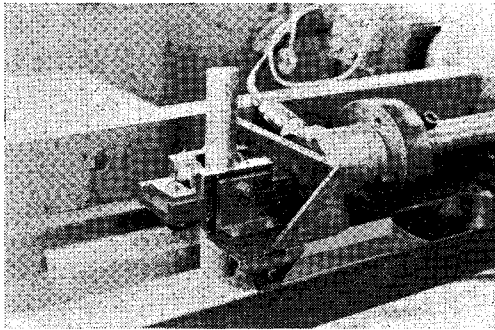


図-2 実験概要図

* 正会員 工博 東京大学助教授 地震研究所
** 正会員 建設省土木研究所
*** 正会員 東京大学地震研究所



写真一 模型杭と加振装置



写真二 杭と加振機との結合部

あった。

写真一は実験の様子を示しているが、杭の頭と試験機ピストンとの結合部をよりくわしく示したのが、写真二である。

写真からもわかるように、この実験は実物をかなり縮小したものであって、しかも通常の土構造物の模型実験と同様に相似律に関しては非常にあいまいなもので、この実験結果からただちに定量的に物をいうことはできない。要するに実験方法を提案したにとどまる。

3. 実験結果

実験に採用した外力としては、正弦波、定常的ランダム波（風に相当）、過渡的ランダム波（地震に相当）の三種である。

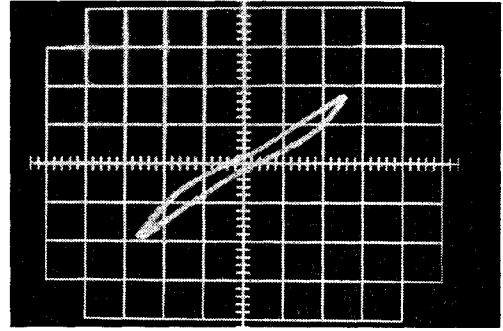
以上の外力のうち、正弦波外力については、計算機制御をせず直接、強制力または強制変位として杭頭に作用させた。

実験の結果のうち、数例を説明を加えながら以下に示していく。

(1) 変位制御実験

乾燥砂中の杭

この場合の復元力特性は、一言でいえばヒステリシス



写真三 復元力特性 (変位制御, 乾燥砂)

横軸 1目盛 5mm

縦軸 1目盛 30kg

を持った硬化ばね形である。

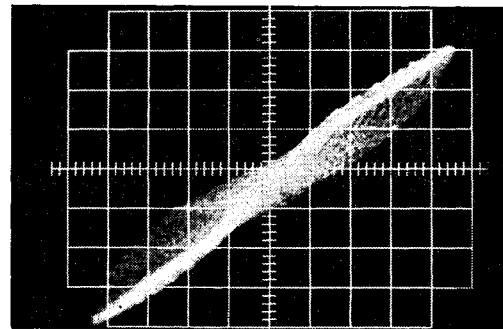
写真三 (外力: 正弦波 1Hz, 変位制御)

これは、乾燥砂中の杭の典型的復元力特性であって、鋼片持ばりなどのように降伏して、軟化ばね特性を示すものとは全く異なった性状である。杭自身の材料は、鋼またはプラスチックを用いたので、杭自身の復元力特性は、鋼片持ばりと同様軟化ばね特性を持っているものと想像されるので、この写真の復元力特性は、杭周辺地盤の影響によるものと考えられる。この点については、すでに後藤博士らが指摘している。また、林博士らの現場試験結果からも同様な傾向が認められる。

砂箱中の砂はバイブレーターにより締固めてはいるが、十分締まっているとはいえ、杭の変位が小さい間は、そのばね係数も小さいが、変位が大きくなるにつれ、杭に直接接触し圧縮されている部分の砂の密度が大きくなって、ばね係数も大きくなるのではなからうか。

写真四 (外力: 過渡正弦波 3Hz, 変位制御)

振動1周期の間の復元力特性は、たしかに写真三のように硬化ばね型である。しかしながら、正弦波外力を振動数を変えずに徐々に大きくして行った場合どのような性質が現われてくるであろうかを示したのが本写真である。



写真四 復元力特性 (変位制御, 乾燥砂)

横軸 1目盛 1mm

縦軸 1目盛 5kg

写真で軟化曲線を示す濃い部分は、各ヒステリシスの最大値の軌跡である。つまり、1周期の復元力特性は硬化ばね型であるが、外力振幅が大きくなるにつれて、復元力の最大値は、頭打ちとなり軟化曲線を描くのである。

写真-5 (外力：定常ランダム波、変位制御)

外力波形が複雑となると復元力特性も星雲のような複雑な形状を示すようになる。しかし、これには杭頭のピストンとの結合部のガタの影響も多少含まれているものと思われる。

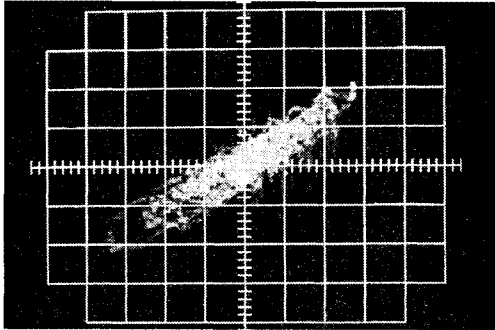


写真-5 復元力特性 (変位制御, 乾燥砂)
横軸 1目盛 1mm
縦軸 1目盛 10kg

湿った砂の中の杭

ここで湿った砂と称しているのは、含水比 13.4%、成形すればその形状を保っている程度であった。この場合の復元力特性は、砂が乾燥している場合と異なって、杭が振動する際、周辺地盤との間にすき間があいてしまうという特長が認められた。そのため、復元力特性にもその影響が現われて来ている。

写真-6 (外力：正弦波 6 Hz、変位制御)

杭と周辺地盤の間にすき間ができた場合、すき間の間では復元力はほぼゼロになってしまうため、写真で認められるように、振動の原点付近では、復元力曲線は水平となってしまっている。

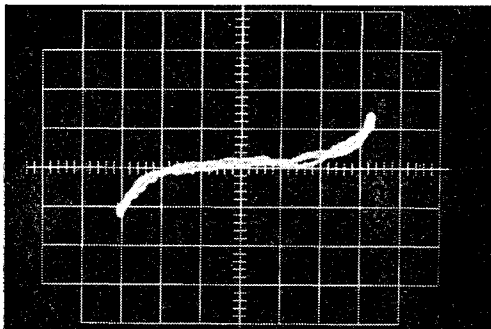


写真-6 復元力特性 (変位制御, 湿った砂)
横軸 1目盛 1.5mm
縦軸 1目盛 10kg

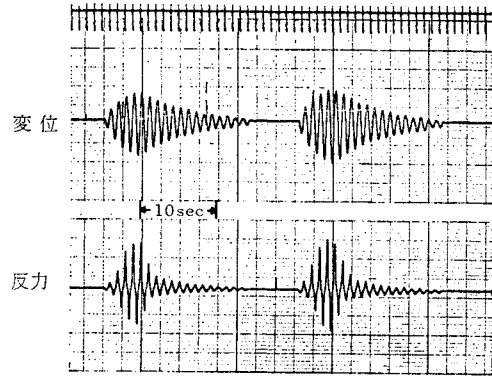


図-3 過渡的正弦波 1 Hz (湿潤砂 I, 変位制御)

図-3 (外力：過渡正弦波 1 Hz, 変位制御)

この図は横軸が時間を示しているが、強制変位と復元力との関係は線形の場合には波形が相似でなければならないはずであるが、主要動部を過ぎると復元力が急激に落ち込んでいるのが認められる。これは、杭の振動が大きくなって、杭と周囲の地盤の間にすき間ができたため復元力が小さくなってしまったものである。

飽和砂中の杭

飽和砂の場合、杭を振動させると、周辺地盤のうち杭に接触している部分はただちに液状化する状態であった (含水比 27.8%)。ただ、杭から少し離れた部分は流動化せず十分締まっているようであった。そのため、復元力特性は、乾燥砂の場合とほぼ同様の性質を示した。いま、地震時の砂地盤中の杭の挙動を考える場合、この模型実験方法では、地盤全体を振動させていないため、全体としての地盤の流動化現象が生じないので、前述のように復元力特性は乾燥砂の場合とほぼ同様になってしまうものと思われる。

実際の地震時の震害を頭に描いて室内実験を行なうには、われわれの行なった実験装置の砂箱部分を振動台上にのせ、地震加速度通りに、地震台を振動させながら、杭頭に本実験通りの力なり、変位なりを与えるべきであ

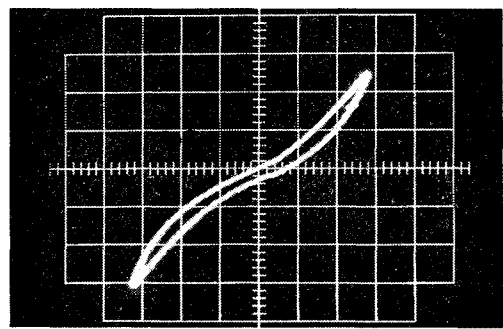


写真-7 復元力特性 (変位制御, 飽和砂)
横軸 1目盛 1.5mm
縦軸 1目盛 5kg

るととった。

写真一七（外力：正弦波 1 Hz, 変位制御）

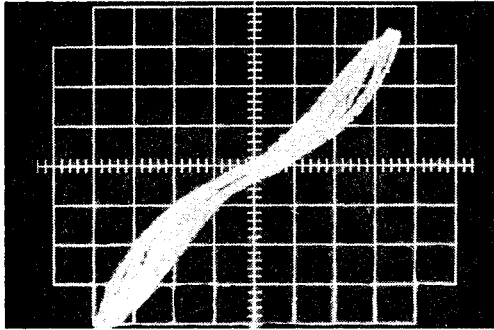
復元力特性は乾燥砂中の杭の場合とよく似ている。

写真一八（外力：過渡正弦波 1 Hz, 変位制御）

正弦波強制変位を徐々に大きくしていった場合である。

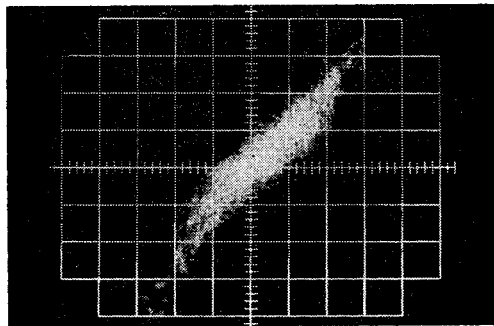
写真一九（外力：擬似地震波, 変位制御）

擬似地震波の場合には、期待通り、星雲のようになるが、その包絡線は硬化ばね形状を示している。



写真一八 復元力特性 (変位制御, 飽和砂)

横軸 1目盛 1mm
縦軸 1目盛 10kg



写真一九 復元力特性 (変位制御, 飽和砂)

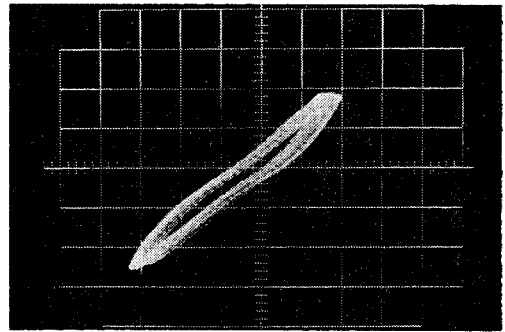
横軸 1目盛 2mm
縦軸 1目盛 10kg

(2) 力制御実験

これは杭頭に強制振動力を加える実験であるが、この場合の復元力特性は、強制変位の場合と異なって、永久変形を生じるという点である。しかしながら、本実験の杭の場合は、砂箱の砂は表面付近の杭周辺を除いて流動化しないため、永久変形はなかなか生じなかった。このことは、さきにも述べたが、地震時には地盤全体が流動化する可能性もあり、この実験結果のみから、地震時の杭の挙動を推定することはできない。

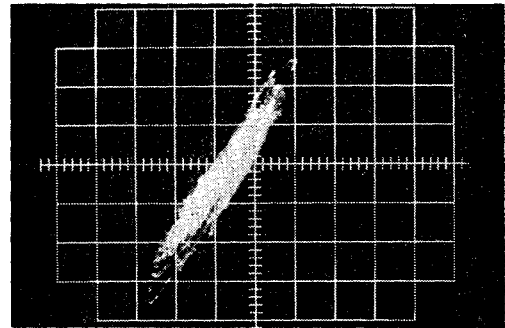
写真一〇（外力：正弦波 3 Hz, 力制御）

正弦波強制力を加えた場合に、永久変形が生じるよりむしろ全体としての平均的なばね係数が変化し、ヒステ



写真一〇 復元力特性 (力制御, 飽和砂)

横軸 1目盛 1mm
縦軸 1目盛 15kg



写真一一 復元力特性 (変位制御, 飽和砂)

横軸 1目盛 2mm
縦軸 1目盛 50kg

リシス曲線の勾配が緩やかになることが認められる。

写真一一（外力：擬似地震波, 力制御）

大きな非線形性は無いように見える。

図一四（外力：擬似地震波, 力制御）

変位の振動中立軸が大きくずれているのが認められるが、それも、振動が終わったあとの永久変形はそれほど大きなものではない。これは、周辺地盤が降伏、ないしは流動化する部分が地表面の杭のごく近傍に限られているためではないかと思われる。

(3) オンライン・リアルタイム実験 (ハイブリッド実験)

この実験は、構造物の一部材を構造物の中にあるがままの状態を実験しようとするものであって、構造物がどのように振動して部材をどのように変形させるかは、電子計算機が計算しながら試験機に指示を与える。

図一五（外力：擬似地震波, オンライン制御, 飽和砂）

この図は、擬似地震波が1自由度振動系に作用した時の振動変位と、復元力を示しているが、地震波入力レベルを三段階にわたって大きくした場合、レベルが小さいうちは、きれいな固有振動の誘起が認められるが、レベルが大きくなると、振動変位の大きさは、ほとんど大きくならず、振動周期の長い応答が認められ、かつまた波

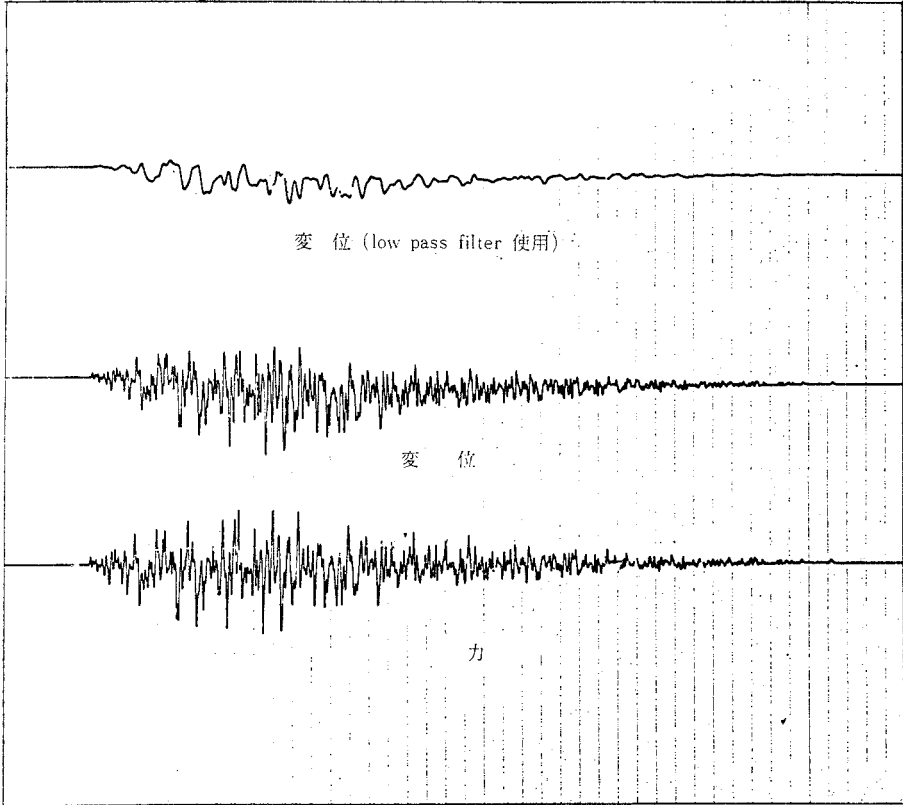


図-4 過渡的ランダム波（乾燥砂，力制御）

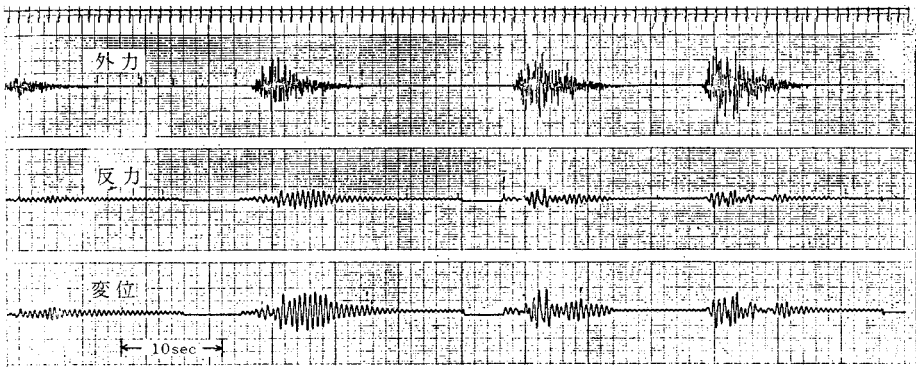


図-5 擬似地震波に対する非線形応答

形がくずれてくる。

振動外力と、それに対応する復元力の波形は、よく近似しており、鋼片破壊実験の場合とは様子が違う。

写真-12：ここに示した復元力特性は、図-4 に対応するものであるが、大体において、正弦波強制変位を与えた場合とよく似ている。これは、振動系の固有振動が誘起されるため擬正弦振動状態になるためと思われる。したがって、もっと地震加速度が大きくなって、振動応答も乱れるようになれば、多少写真とは変わった特性を示すようになるかもしれない。

4. 考 察

本実験における模型杭の復元力特性は、常に硬化ばね型を示したのであるが、力制御実験の際に見たように、何回か非線形領域で振動すると、硬化ばね特性を示しながらも、その平均的ばね係数は低下してくる。したがって、変位振幅（変位の最大値）と復元力との関係は、硬化型ではないと思われるが、その辺を説明するのが図-6 (a), (b), (c) である。

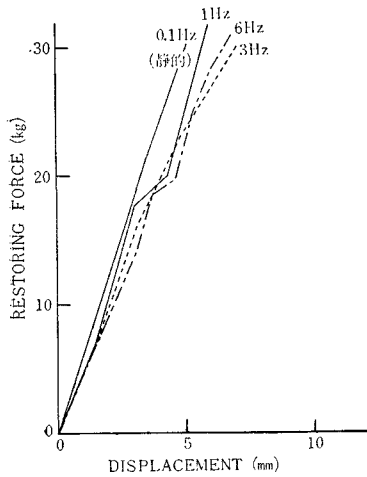


図-6 (a) 変位と復元力最大値の関係(乾燥砂)

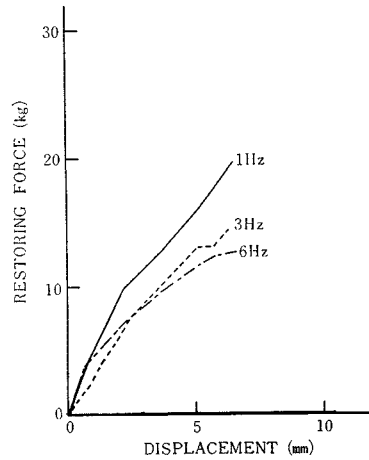


図-6 (b) 変位と復元力最大値の関係(含水比 13.4%)

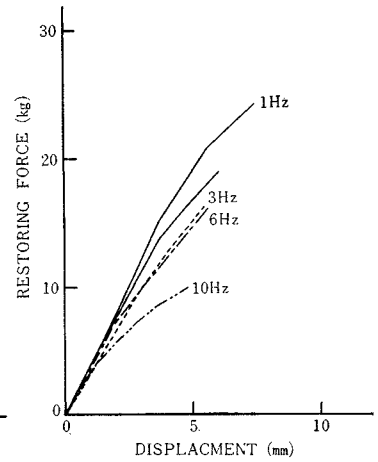


図-6 (c) 変位と復元力最大値の関係(飽和砂)

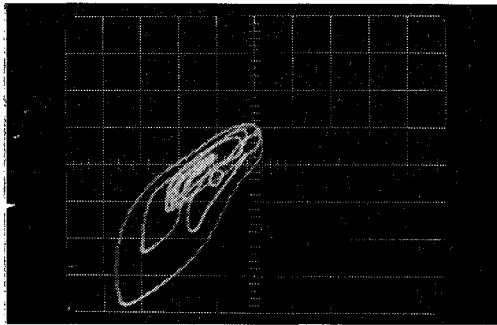


写真-12 復元力特性(オンライン・リアルタイム実験, 飽和砂)

図は、正弦波強制変位を与えた場合の変位最大値を水平軸に、復元力最大値を鉛直軸にプロットしたものであるが、強制変位振幅が大きくなるにつれて、復元力は小さく一種の降伏状態を示すことが認められる。また、その傾向が、乾燥砂よりも湿潤砂の場合に著しいもの肯ける。

以上、模型杭について計算機制御によるオンライン・リアルタイム破壊実験の方法と、二、三の結果を示したのであるが、今後に残された問題として次のような項目が考えられる。

- 1) 砂箱全体を振動台上に載せるなどして、杭接触部

のみではなく、地盤全体が流動化する可能性もあるような実験も試みなくては真の意味の地震工学的実験とはいえない。

- 2) 実験装置そのものを大型化するか、相似率に関する研究を行なうかして、より定量的な実験を考えなくては、設計には役立たない。

この研究は、著者の一人、横山功一の東京工業大学修士論文であり、かつまた、法政大学酒井弘文、林谷茂樹両君には卒業研究として手伝って頂いた。また、研究室の浅野照雄氏には、全体のとりまとめで大きな役割を果たして頂き、目黒一江嬢には、結果の整理などをして頂いた。深謝致します。なお、文部省科学研究費ならびに本四架橋公団の援助を受け、とりわけ吉田巖設計第3課長、多田浩彦補佐にはお世話になりましたので、ここに記して感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- 1) 伯野元彦・四俣正俊・原 司：計算機により制御された、はりの動的破壊実験，土木学会論文報告集，No. 171，昭和44年11月。
- 2) 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，No. 194，pp. 1~11，昭和46年10月。
- 3) たとえば，林 総・宮島信雄：Hパイルの動的的水平荷重試験，第1回日本地震工学シンポジウム，1962。

(1971. 6.17・受付)