

京大工 正 後藤尚男 京大工 正 吉原 進 京大工 正 北浦 勝
 京大院 学生 ○宮脇幸治郎 京大工 松井孝夫

1. はしがき 土木構造物の基礎には種々の形式があるが、大別するとi)浅い基礎(フーチング基礎、ベタ基礎)、ii)深い基礎(ケーソン基礎、杭基礎)になる。このうち重要な構造物に対しては、ケーソン基礎のような地盤に深く根入れされた形式のものが多く採用されている。耐震性の面からケーソン基礎の動的挙動を考える場合、いろいろなアプローチの仕方があるが基礎体のまわりを取巻く地盤自身および構造物基礎体-地盤の相互作用の機構の複雑さから、基礎体の動的な挙動を正確に把握するのはかなり困難である。本文では、これを実験的に追求しようとしたものである。文献1)の基本的な考え方(Fig.1のようなケーソン基礎のモデル化)に基づいて、i)基礎模型の大型化、ii)地盤材料の状態の変化、iii)ランダム振動への拡張をこけて適用した結果を示す。

2. 実験の概要 基礎模型の概略は、Fig.1に示すとおり、重さは約31 kgの剛体で、その底面にレジンと有するものであり、これは固い基礎層上のケーソン基礎を描写化したものである。なおこの基礎模型は底面における地盤反力の影響を除くため振動方向の厚さを薄くしてある。さらにこの基礎模型には、深さ方向および根入れ中央部の水平方向の振動土圧(静止土圧からの増減分の土圧)を測定するための土圧計 P_i ($i=1, 9$) (共和電業製, BE-2KC, 最大±2 kg/cm²)を設置した。また基礎模型頂部には、上載荷重として重錘(重さ約88 kg)と剛結し、その上に加速度計 A_m (新興通信工業製, 非接着型, UA-5G, 最大±5G)および基礎模型の回転角を測るための変位計 L_m (日本測器製, 可動コア型振動計, 508-A, 最大±5 mm)を設置した。さらに入力加速度を計測するため、模型と同一の加速度計 A_s を振動台に取り付けた。

つぎに、地盤層のモデルには、2 mmフルイを通過してFig.2に示すような粒径加積曲線(均等係数 $U_c=3.6$)をもつ滋賀県野洲川産の川砂を自然乾燥、湿潤および飽和の状態にして用いた(Table 1)。この砂を、2.5 m × 1.5 m × 1.0 mの鋼製箱に詰め、これを振動台に加振して十分に固め(約0.5 mの均等な地盤層とるようにした。乾燥砂地盤のときは、地盤と鋼製箱の境界に50 mm厚のソレタノームと貼り付け、境界による波動の重複反射の影響をいっさい軽減するようにした。なお、湿潤砂から飽和砂へと湿潤状態を移行させるときは、地盤層の表面から水を適量散布し、こぼれ置いたから実験を行ない、含水比等は鋼製箱内の計8か所からサンプルを取り出して測定した。このような状態のものを動電型大型ランダム振動台(明石製作所製, ASE-91T型, 最大上載荷重5 ton, 最大変位±50 mm, 最大加振力4 ton \cdot sec)を用いて加振した。

以上のような基礎体および地盤層モデルを用いてi)振動時に基礎体に作用する振動土圧や応答加速度と水平復元力の関係、ii)振動箱の壁に作用する振動

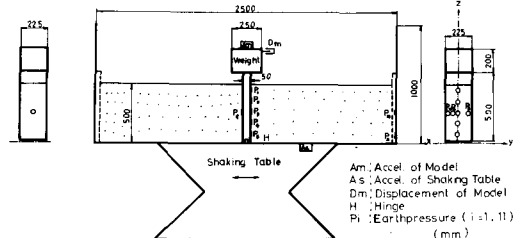


Fig. 1 An Outline of Experiment

土圧による基礎模型からの応力伝播あるいは地盤層自身の(せん断)共振、
 "ランダム"振動時における基礎模型の応答特性などを調べた。実験内容は
 Table 2に示すとおりである。ここに定振動(Sweep)とは、加速度振幅一定
 として振動周波数を漸次増加減少させていくような振動という。

3. 実験結果 得られた実験結果の一例とFig. 3~8, Photo. 1~3に示す。

(1) 振動土圧に関する結果: Fig. 3は、振動土圧の鉛直分布を示している。こ
 こに [1], [2] および [3] はそれぞれ砂地盤が乾燥(D), 湿潤(W) および飽和(Ws)
 の状態に対するものであり, (a) は基礎模型の応答回転角を一定としたとき
 の定常的正弦波入力に対する結果であり, (b) は加振周波数を一定にして振
 幅を徐々に変化させる過渡的正弦波入力に
 対する結果である。いずれの結果におい
 ても基礎模型の根入れ長のほぼ半分付近にお
 いてピークをもっているが, [1], [2] および
 [3] または (a) および (b) の対応において鉛直振
 動土圧分布形がすべて一様な相似形を示す
 とは限らない。水平振動土圧分
 布形に対しても同様である。

Fig. 4 は定振動入力に対する基
 礎模型の根入れのほぼ中央に位
 置する土圧 P_0 の測定結果を示す。
 砂層の状態が乾燥, 湿潤および
 飽和の順に, 一定入力レベル
 (入力加速度振幅 100 gal) に対
 する振動土圧の応答レベルが低

くなる, 最大点を示す加振周波数も低くなっていく様子が見られる。これは含水比が増加するにつれて,
 砂の剛性は低下するが, 減衰力は増大していることを示している。また, 乾燥状態における振動土
 圧の2個のピークの位置は, 振動箱の壁の振動土圧 P_{10} のピークの位置と一致している。すなわち 16Hz
 付近のピークは基礎模型の共振点であり, 23Hz 付近にあるピークは, 振動箱の共振点あるいは地
 盤層の共振の影響と思われる。もしなら, 基礎模型を取り去った状態, 不加振しても P_{10} のピークは 22Hz
 の近くで生じているからである。また, 16Hz
 付近で加振した場合基礎模型のまわりの砂の
 動きはかなり流動的であるが, 基礎模型から
 十数cm離れると砂は一体的な動きを呈した。
 24Hz 付近では, 基礎模型と砂地盤の相対的
 な動きは約 16Hz で加振したときよりもはる
 かに小さかったが, 振動箱の壁付近の表面の

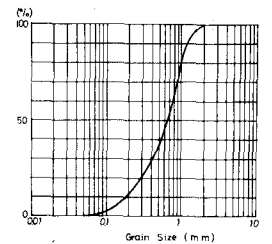


Fig. 2 Grain-size Distribution

Table 1 State of Sand Layer

	Dry (D)	Wet (W)	W _s	W _s	W _s
γ (kg/cm ³)	1.76	1.65	1.67	1.68	1.69
Water Content w _r (%)	0	5.8	7.0	16.6	20.9
w _r (%)	0	5.9	12.6	20.8	24.6
Void Ratio	0.51	0.70	0.67	0.65	0.64

Table 2 Classification of This Experiment

Input Acceleration	Dry State			Wet State		
	Stationary	Transitional	Sweeping	White Noise	Pink Noise	Earthquake
Fig.						
Def.	A _s : Excitation Acceleration (gal) Sweeping speed is Log. Sweep			F(t): Fourier Spectral (gal/Hz)		

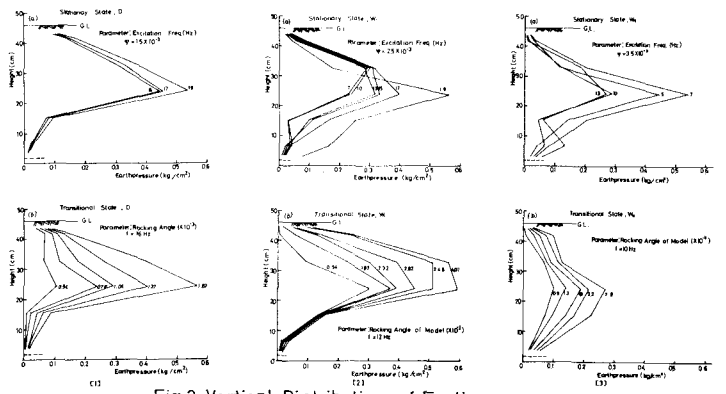


Fig. 3 Vertical Distribution of Earthpressure

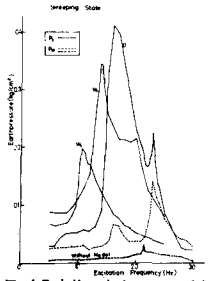


Fig. 4 Relation between P_0 & Excitation Frequency

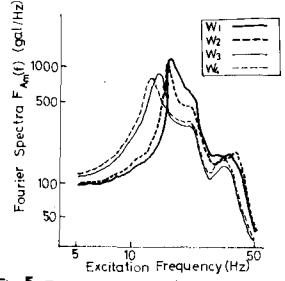


Fig. 5 Fourier Spectra for Sweeping Excitation

砂は流動化し、壁面近くで下にもぐり込む動きをした。

(2) 加速度に関する結果: Fig.5は、地盤層の状態を湿潤から飽和に移行させたときの定振動(加速度振幅50gal)に対する応答加速度のフーリエスペクトルを示す。図より含水比が増加するにつれて共振周波数が低くなる、フーリエスペクトルのピークも下がっていく傾向にあることがわかる。これは、Fig.4で述べたと同様に地盤の反力は含水比の増加に伴って小さくなるが、減衰力は増加するためであろう。

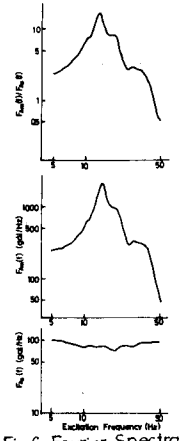


Fig.6 Fourier Spectra

Fig.6は、湿潤状態Wで定振動(加速度振幅100gal)を行っ下ときの入力加速度と応答加速度のフーリエスペクトルF(f)および両者の比(応答伝達率)を示している。応答のフーリエスペクトルはほぼ8Hzのところから急激に立ち上りを示し、14Hz付近にピークをもう途中少々乱れて下降している。これらの乱れは、入力が周波数により若干変動しているのその影響により基礎模型の振動の乱れを伴ったと思われる。なお白色雑音を入力としてフーリエスペクトルを求めたが、「ゆらぎ」が多いがほぼ同様の傾向を有する図が得られた。

(3) 水平復元力に関する結果: Fig.7は振動土圧合力により求めたモーメント M_R と基礎模型に作用する慣性力より求めたモーメント M_I との関係を示したものである。

また[1], [2]および[3]はそれぞれ砂地盤が乾燥、湿潤および飽和の状態に対する結果を示している。図からわかるように、水平復元力レベルが小さいときは、 M_R と M_I とで

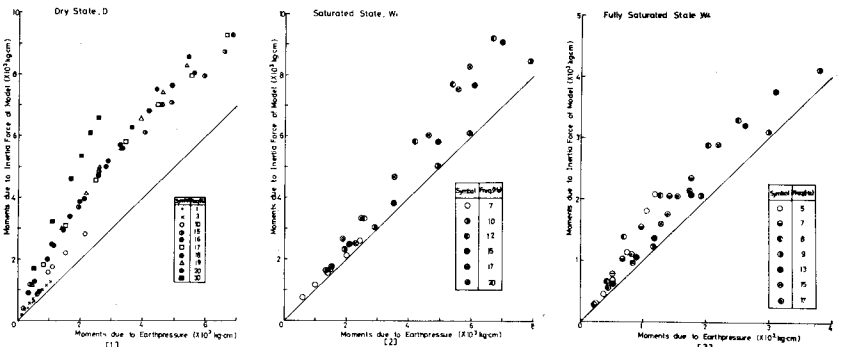


Fig.7 Moment due to Horizontal Restoring Force

動的平衡状態にあり、水平復元力レベルの大きさや加振周波数の高低により他の力による抵抗力(粘性減衰、摩擦抵抗など)の影響が変化することがわかる。

(4) ランダム波加振に関する結果: Fig.8は、白色雑音で加振したときの湿潤砂Wの状態における入力加速度、応答加速度および応答回転角に対するパワースペクトルを示している。図よりわかるように応答は17Hz近傍に共振周波数をもつ、かなり鋭いピークとなっている。また応答のパワースペクトルのオーダーは入力のそれより1~2桁上のオーダーの値を示し、各周波数において応答はよく増幅されている。またピークが鋭くなっているのは履歴復元力特性を示すヒステリシスループのふくらみの薄いこととおおむね対応している。

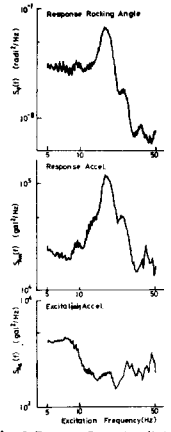


Fig.8 Power Spectra (W.N, W)

Photo.1は、Fig.8で示した白色雑音に対する入力および応答加速度の自己相関関数と確率密度関数とを表わしたものである。自己相関関数についてみると、入力は遅延時間で=0秒で1という相関をもつが、それが0より大きくなると急激に減衰しており、白色雑音に近い波であることが確認される。また応答の自己相関関数はほぼ0.06秒の周

期をも
 っているから、
 基礎模型の固有振動
 数は約
 16.7Hz
 (=1/0.06sec)
 である
 うと推

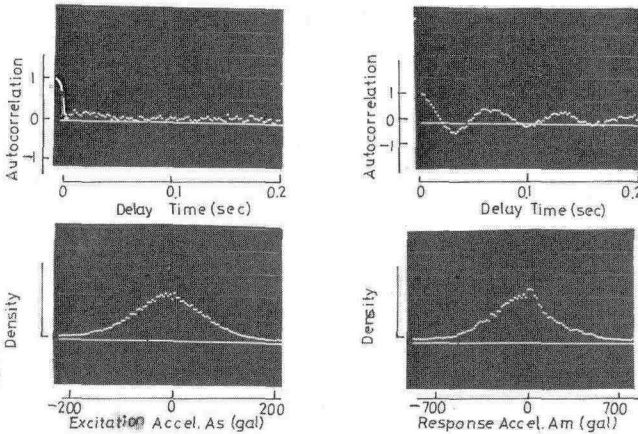


Photo.1 Correlation & Density Function

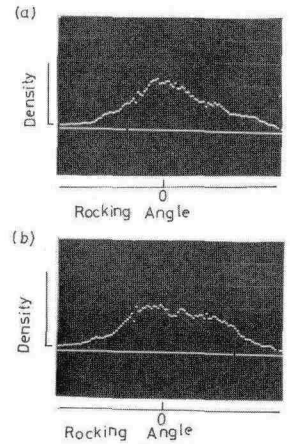


Photo.2 Density Function

定される。この値はFig.8より得た値とよく一致している。以上のことは、白色雑音のように周波数に対して一様な強さをもつ波から、構造物が自己の固有周波数付近の周波数成分を大部分吸収していることを意味するから、よくいわれるように構造物がバンドパスフィルタのような挙動を呈することが確かめられたことになる。フック確率密度関数についてみると、入力にはほぼ正規分布の形を示しているが、応答は少し正の側にひずんだ形を示している。これは、マルコフ過程を線形振動系に用いたとき入力が正規分布なら応答も正規分布になるという性質に対して、系が非線形であるがゆえに生じた一つの興味深い実験結果であろう。ただし応答の密度関数の図より、この場合の非線形性とは何んらかの理由からたとえばあらかじめ基礎模型が傾いているとか基礎模型の中立位置の両側において土の締め固めの程度が異なっているという理由で、中立位置の両側における土の硬さが異なるということを示していると考えられる。

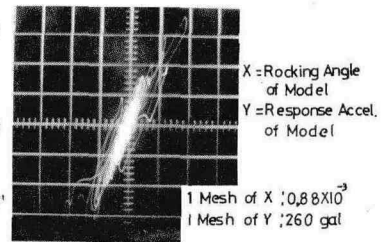


Photo.3 Hysteresis Loop

Photo.2 (a) は、白色雑音に対する湿潤状態 W₁ における応答回転角の確率密度であり、(b) は同じく飽和の状態 W₂ のものである。含水比の少ない方がピークが鋭い。これは地盤が (b) より硬いので基礎模型は中立位置から大きく回転することはないということを示している。一方 (b) は含水比が大きくなり、地盤は軟かいので確率密度は幅広く分布しており、回転角の分散は大きくなっている。

Photo.3 は、実地震記録の加速度を入力とした（ただし、時間軸は 1/10 に縮め、縦軸の縮尺は適当に決めた）、その応答記録例を乾燥砂の場合について示してある。このような応答は非常に複雑な挙動を示し、構造物基礎と地盤との相互作用の解明の困難さがうかがえる。

4. あとがき 本実験は、実構造物との相似関係をほとんど無視しているが、文献(1)の模型の幾何学的相似律をほぼ2にしている。なお乾燥砂においては文献(1)で述べられている結果とよい一致を示した。また入力がランダム波の場合や砂地盤の状態の変化する場合について動的現象のある程度の結果をうることができた。なお本実験は本四公団の委託研究によるものである。最後に、この実験に多大な便宜を下さるため東京大学防災研究所南井研究室の各位に対して謝意を表わす次第である。

参考文献(1) 後藤・吉原・北浦・太田：「構造物基礎の水平復元力特性に関する実験的研究」防災年報 143A, 542