

地震時における構造物基礎模型の復元力と応答 に関する実験的研究

後藤 尚男・吉原 進・北浦 勝
宮脇幸治郎・横山 正義

EXPERIMENTAL STUDY ON THE HORIZONTAL RESTORING FORCE AND THE RESPONSE OF THE STRUCTURAL FOUNDATION SUBJECTED TO EARTHQUAKES

By *Hisao GOTO, Susumu YOSHIHARA, Masaru KITaura,*
Kojiro MIYAWAKI and Masayoshi YOKOYAMA

Synopsis

This study deals with experiments on the horizontal restoring force and the response of a rigid structural foundation surrounded by surface layers subjected to earthquakes. Model surface layers used in the experiments are composed with dry sand and fully saturated sand. Vibrating models have circular, square and rectangular sections. It is shown that the surface layer and model foundation system in vibration works as a band pass filter. The behavior of the model varies with the water content of the surface layer and with the mode of excitation, but the tendencies of the behaviors of the models are similar.

1. ま え が き

最近の傾向として土木構造物は良好な地盤のみならず軟弱な地盤にも建設されることが多いので、構造物基礎にはますます耐震的に安全な設計が望まれる。一般に構造物基礎は地盤にとり囲まれているので、基礎—地盤系としての振動特性を把握することが重要である。これまでに動的耐震設計法の確立を目指して幾多の研究がなされているが、地盤という複雑な要素がからんでいるので未だ一般性のある結論をうるに至っておらず、現在実験的研究資料の集積段階にあると言ってよからう。

本研究は地震のように時間的に不規則な波形が作用したときの、構造物基礎の動的挙動を取り扱ったものである。これまでの実験的研究の多くは、地震波を最も単純化した正弦波による加振実験である¹⁾。しかしながらランダムな波形が構造物に作用したときの応答波形は、正弦波のように一定な振幅と振動数を持った規則的な波形とはなりえず、当然のことながら不規則な挙動を示す。また正弦波加振とランダム波加振とは振動数特性や振幅特性が非常に異なるため、力学的なエネルギーの消費の様子や減衰力、地盤の剛さ、これらを総合した反力および構造物の動的応答特性などにかなりの差があることが予想される。著者らの一部はすでに鋼製の矩形断面模型を5通りの含水状態にある砂層に根入れさせ、各状態において模型に正弦波とランダム波を入力として作用させたときの実験の一部を取りまとめて発表した²⁾。その後他の断面形状を持つ模型についても実験を行なったので、ここにそれらの結果をとりまとめて報告する。

先の実験的報告²⁾を通じて明らかになった点を要約すると以下のとおりである。

1) 構造物基礎に作用する振動土圧の深さ方向および水平方向の分布は、砂地盤の含水比や入力正弦波の振幅の時間的变化、加振振動数によってその形状がかなり変化する。

- 2) 砂地盤の含水比の増加とともに地盤の剛性が低下し、振動土圧の大きさや固有振動数も低下する。
- 3) ランダム波が作用すると、構造物基礎がバンドパスフィルタのような挙動を呈する。またある振動数範囲のみにエネルギーを持つようなランダム波が作用すると、構造物基礎の共振振動数は人力の加振振動数帯域に近い方にずれる。
- 4) ランダム入力の変幅の確率密度関数がほぼ正規分布に近くても、復元力曲線の非線形性のゆえに応答の確率密度関数は正規分布からずれる。
- 5) 構造物の固有振動数よりも低い振動数成分のみで構成されているランダム波が作用したときの復元力は、同様の範囲の振動数を持つ正弦波加振時のそれとよい対応を示している。

以上の成果を踏まえて、本研究においては円形断面模型、正方形断面模型および矩形断面模型を乾燥砂と水で飽和された砂に順次根入れさせ、同様な外力を加えてその挙動を実験的に追求した。また得られた結果を先の結果²⁾と比較し、模型の断面形状の違いが応答に及ぼす影響についても若干考察を加えた。

2. 実験装置および実験方法

実験見取図の概略と模型の諸元は Fig. 1 および Table 1 に示すとおりである。模型は円形断面模型 ($\phi 267\text{mm}$)、正方形断面模型 ($250\text{mm} \times 225\text{mm}$) および矩形断面模型 ($50\text{mm} \times 225\text{mm}$) の 3 種類である。いずれも高さ 600 mm の鋼製の剛体で、その底部にヒンジを有し回転運動のみが可能な 1 自由度系とした。これは固い基盤層上の構造物基礎を抽象化したものである。また模型底面における地盤反力の影響を少なくするため、模型底面にはウレタンフォームを敷きつめた。なお矩形断面模型のみ底部のヒンジを取り除き、より実際の基礎に近い状態にした実験も実施した。この模型に作用する深さ方向および根入れ中央部における水平方向の振動土圧を測定するために土圧計 P_i ($i=1\sim 9$, 共和電業製, BE-2KC, 最大 $\pm 2\text{kg/cm}^2$) を接着した (ただし円形断面模型は深さ方向のみに接着した)。砂地盤が水で飽和されている場合の円形断面と正方形断面模型には、根入れ中央部以下に 2 個の水圧計 U_2, U_3 (豊田工機製, PMS-5M 型, 最大 0.5kg/cm^2) を取り付け、振動時の過剰間隙水圧を計測した。模型頂部には上載荷重として重錘を剛結し、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 $\pm 5\text{G}$) および模型回転角を計測するための変位計 D_m (日本測器製, 可動コア型振動計, 508-A, 最大 $\pm 5\text{mm}$) を設置した。また模型に取り付けたものと同一の加速度計 A_s を振動台にも取り付け、入力加速度を測定した。

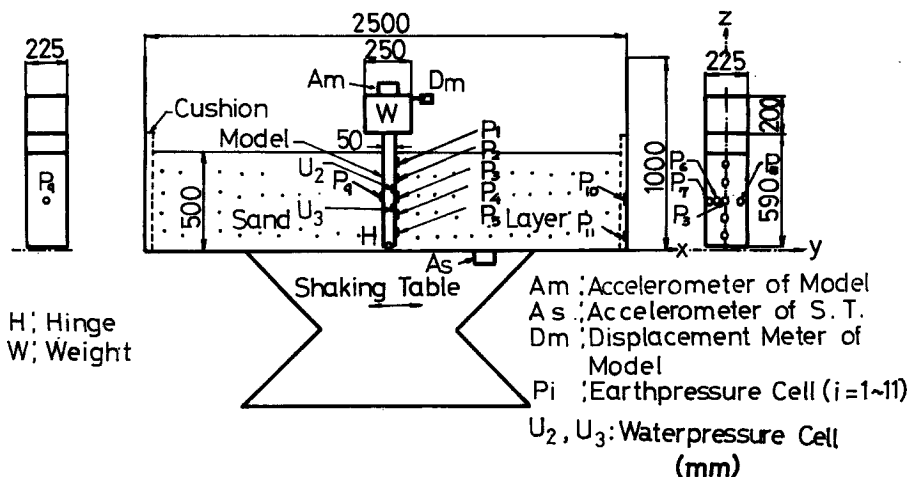


Fig. 1 General view of experiments.

Table 1 Dimension of Models.

Dimension	Model	Circular		Square		Rectangular	
	Sand	Dry	Wet	Dry	Wet	Dry	Wet
Area of Section (mm×mm)		$\phi 267$		250×225		50×225	
Height (mm)		600		600		600	
Weight on the Model (kg)		65.5		21.8		88.0	
Total Weight (kg)		108.5	126.7	79.0	95.7	117.6	119.9
Height of Center of Gravity (mm)		529	482	395	337	610	602
Moment of Inertia about a Hinge (kg·cm·sec ²)		364	367	168	174	503	504

地盤層の材料には、2mm フルイを通過した Fig. 2 に示すような粒径加積曲線（均等係数 $U_c=3.6$ 、有効径 $D_{10}=0.19$ mm）を持つ滋賀県野洲川産の川砂を自然乾燥および湿潤の両状態にして用いた（Table 2）。この砂を、振動方向長さ 2500 mm、振動直角方向長さ 1500 mm、高さ 1000 mm の鋼製の土槽に詰め、これを振動台上で加振し十分締め固めて深さが約 50 cm の均等な砂層地盤となるようにした。地盤と土槽の境界には 50 mm 厚さのウレタンフォームを貼りつけ、境界による波動の重複反射の影響を多少なりとも軽減するようにした。なお、乾燥砂を湿潤状態へ移行させる際には、砂地盤の表面から水を適量散布し、1 日放置した後実験を当なった。このような状態の基礎模型を動電型大型ランダム振動台（京都大学防災研究所設置、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 G）上に設置して加振した。

Table 2 State of Sand Layers.

Sand	Dry	Wet
Character		
Bulk Density (g/cm ³)	1.34	1.84
Water Content (%)	1.2	36.3
Degree of Saturation (%)	4.0	100.0
Porosity (%)	49.4	48.4

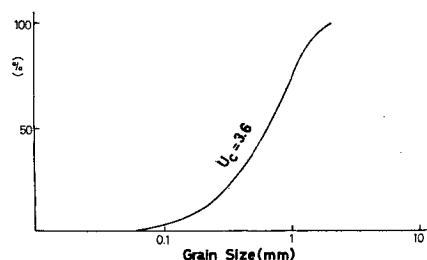


Fig. 2 Grain size distribution curve.

実験はまず乾燥砂地盤に 3 種の模型を順次根入れさせ、それぞれの模型に正弦波加振とランダム波加振実験を、また正方形断面模型を除く他の 2 種の模型には静的載荷実験をも実施した。正弦波加振実験には定常的、振幅漸变的および定振幅の 3 種類がある。定常的正弦波加振は、入力正弦波の加速度振幅と振動数を適当に設定し、応答が定常的と思われる状態で加振することである。また加振振動数にかかわらず模型の応答回転角が一定となるように入力加速度振幅を定めて加振する場合もある。振幅漸变的正弦波加振は、入力正弦波の振動数を一定にしたまま、入力加速度を 0 gal からある大きさまで漸次増加させる状態の加振である。次に定振幅正弦波加振とは、いわゆる Sweep Test のことであり、入力の加速度振幅を一定値に固定したまま加振振動数がある範囲で連続的に上昇または下降させるという加振である。

ランダム波加振においては大きく 2 種類の波形を用いた。1 つは比較的広帯域ノイズ (ホワイトノイズ)* であり、入力加速度のパワースペクトルが比較的広い振動数領域にわたって一定であるようなランダム波である。ただし振動台の性能や模型の固有振動数などを考慮して、約 5 Hz から約 50 Hz までの範囲における振動数成分がほぼ一様に含まれていれば、このノイズに属するものとした。他の 1 つは比較的狭帯域ホワイトノイズ** である。この波はそのスペクトルがある限られた振動数帯域でエネルギーを有し、その他の振動数成分を持たないものである。

静的載荷実験においては、模型の頂部付近 (ヒンジからの高さ 60 cm) にワイヤーを取り付け、荷重のかかる方向を調整するため 2～3 個の滑車を通したのち、その一端に重錘を順次載荷していった。1 個の重錘は約 10 kg であるから、1 個の重錘を載荷するごとに約 $0.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ の回転モーメントがかかることになる。なお測定は 1 個の重錘を載せたのち、模型の変位がほぼ静止する 1 分後に模型頂部に取り付けたダイヤルゲージで読みとるという方法をとった。

乾燥砂について以上の実験を行なったのち、地盤を湿潤飽和状態にして、乾燥砂における内容と同じ実験を繰り返した。

3. 静的載荷実験の結果

前節に述べた方法により得られた静的載荷実験の結果を示す。Fig. 3 と 4 は、円形断面模型をそれぞれ乾燥砂と湿潤飽和砂に根入れしたときの結果である。両図はいわゆる復元力曲線であり、縦軸は復元力モーメント (= 静的加力モーメント)、横軸は模型回転角である。図中、各履歴曲線の最大点につけられた数字は水平交番加力の加られた順番を表わしている。Fig. 3 によると各履歴曲線の最大点はその順序にかかわりなく、ひとつのなめらかな曲線の上にあることがわかる。この曲線を復元力曲線の最大点曲線***と呼ぶ。この曲線は原点付近においてはかなり直線に近いが、模型回転角が大きくなるにつれて大きな曲率を持ち、全体としては軟化ばね型の傾向を表わしている。最大点曲線上の回転角が比較的小さい $2.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$ なる点と原点とを結ぶ直線の傾きを求め、これを回転角が 0 rad から $2.3 \times 10^{-3} \text{ rad}$ までの平均回転ばね剛性 k_r とすると、 $k_r = 4.0 \times 10^6 \text{ (kg} \cdot \text{cm)}$ を得る。各履歴曲線の形状に注目すると、回転角が約 $5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ より小さい間はスリップの効いた摩擦型となるが、回転角が大きくなると紡錘型を示している。各履歴曲線において荷重の増大時の分枝を見ると、模型回転角が小さい間は硬化ばね型であるが、大きくなると軟化ばね型の傾向が現われている。これは回転角が比較的小さい範囲で増大すると砂が密になり、見掛けの剛度が増大して硬化ばね型の傾向を示すが、回転角が大きくなるとクリープによるひずみの影響が支配的となるからであろうと考えられる。Fig. 4 の湿潤砂の場合を全体として見ると、各履歴曲線には軟化ばね型の傾向が強く現われている。これは地盤が水を含んで軟らかくなったことによる主としてクリープによるひずみの影響であろうと推察される。最大点曲線は、第 1 サイクル目の履歴曲線が模型近傍の地盤剛度の不均一性のために若干乱されているものとして除外すると、乾燥砂の場合よりもより軟らかな軟化ばね型傾向を示し、回転角

*, ** 以後それぞれノイズ A, ノイズ B と呼称する。

*** 復元力曲線における各履歴ループの最大点を結んだ曲線のことで、文献 3) に詳しく述べられている。

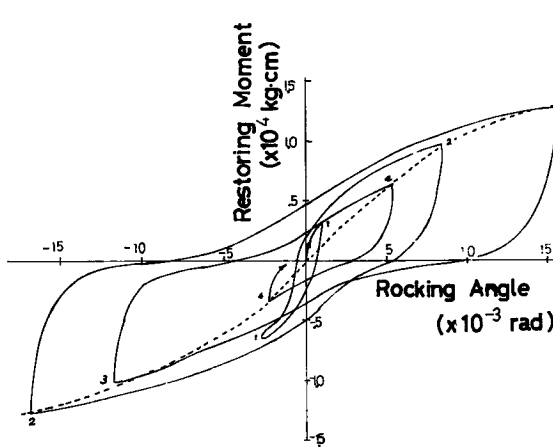


Fig. 3 Relation between restoring moment and rocking angle of model, loaded statically, dry, circular.

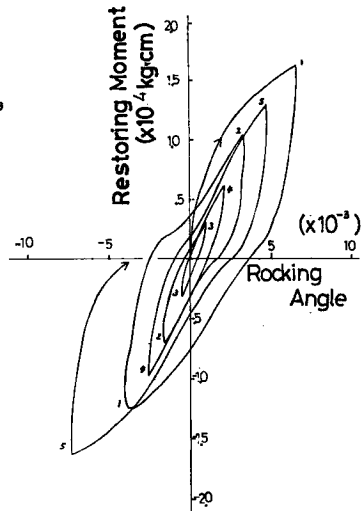


Fig. 4 Relation between restoring moment and rocking angle of model, loaded statically, wet, circular.

がほぼ 10×10^{-3} rad を越えると降伏状態に近い様相を呈している。乾燥砂の場合と同様な方法により、湿潤砂における平均回転ばね剛性 k_r' を求めると、 $k_r' = 1.4 \times 10^6$ (kg·cm) となる。これより乾燥砂におけるばね定数 k_r と湿潤砂におけるそれ k_r' との比は、 $k_r/k_r' = 2.9$ となり、円形断面模型においては、回転角を 2.3×10^{-3} rad までに限るなら、平均的な回転ばね剛性は乾燥砂時には湿潤砂時の約 3 倍であるといえる。

なお矩形断面模型における以上の諸量はそれぞれ $k_r = 5.0 \times 10^6$ (kg·cm), $k_r' = 4.0 \times 10^6$ (kg·cm), $k_r/k_r' = 1.25$ となり、この場合には k_r と k_r' の値はあまり変わらない。復元力曲線の形そのものは乾燥砂においては円形断面模型とよく似ているが、湿潤砂においては回転角が大きくなるにつれて円形断面模型の方が非常に軟らかくなっている。いずれの場合にも円形断面模型のばね剛性の方が軟らかいと言える。

4. 正弦波加振実験の結果

本節では 1 自由度のロッキング振動をする構造物基礎に正弦波が作用したときの応答について考察を加える。なお本節の最後において、模型底部のヒンジをとり去った場合の応答について少し触れる。

Fig. 5 は各状態の共振振動数付近の加振振動数による振幅漸变的正弦波加振において、基礎模型に働く水平振動土圧を模型の中心線に沿って深さ方向に測定した結果である。同図より砂層の含水状態にかかわらず振動土圧の深さ方向の分布は、根入れ深さの中央部付近で最大点を持つ三角形ないしは放物線状をしていることが知られる。模型がその底部でヒンジ結合されていることを考慮すると、地盤の水平剛度の深さ方向の分布は深さに比例して剛度が増す、いわゆる静水圧状であろうと推察される。乾燥砂において同一の模型回転角に対する土圧を比較すると、矩形断面模型の値が最も大きく、次いで円形断面、正方形断面模型の順である。矩形断面模型は振動方向の寸法が他の二者に比較してかなり小さいので、模型側面の摩擦抵抗や底面の土圧反力が小さく、したがって外力に対する抵抗はほとんど模型の前後面にかかる土圧反力が受け持っているものと考えられる。これが矩形断面模型の土圧が最も大きくなる理由と考えられる。また円断面模型の振動土圧が正方形断面模型の値より大きくなっているのは、後述するように正方形断面模型の振動土圧の水平方向分布が、中心線に沿った部分より縁部に大きな振動土圧を生じるいわゆる剛体分布を示すことに

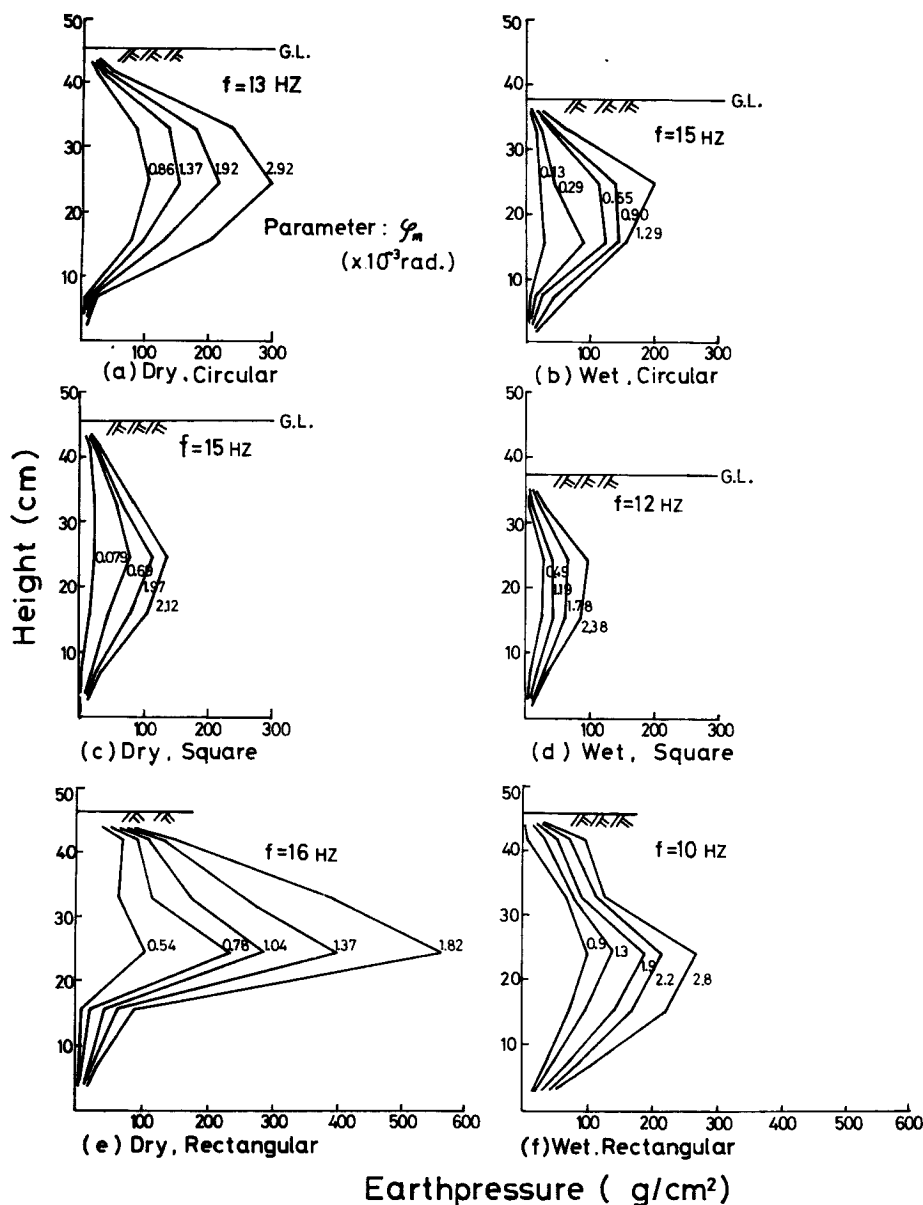


Fig. 5 Vertical distributions of earthpressure.

よるものと思われる。湿潤砂においては、同一模型回転角に対する土圧の大きさは円形断面模型が矩形の値よりもやや大きく、正方形断面模型の値は最も小さい。乾燥砂の場合とは異なり、わずかであるが円形断面模型の値が矩形のそれより大きくなっているが、このことには各模型に作用する土圧の水平方向の分布や水圧なども関わり合っており、今回の実験データのみでは、これらの現象に対する十分な考察はできなかった。

Fig. 6 と 7 は内容は Fig. 5 と同じであるが、模型の各深さでの振動土圧が模型回転角によりいかに変化しているかを示したものである。Fig. 6 の円形断面模型では $P_2 \sim P_4$ の振動土圧は回転角に関してほぼ比例的に増加し、一方最も浅い P_1 は回転角が小さいときから降伏状態にある。正方形断面模型 (Fig. 7) では、

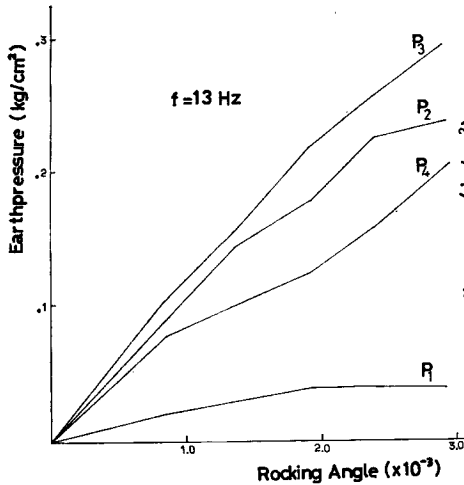


Fig. 6 Relation between earthpressure and rocking angle of model, dry, circular.

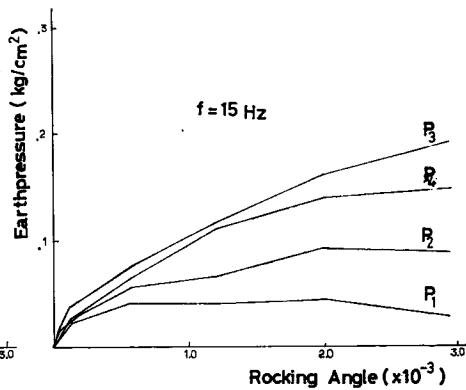


Fig. 7 Relation between earthpressure and rocking angle of model, dry, square.

P_1 から P_4 までの各振動土圧は小さい回転角から軟化ばね型の非線形性を示し、回転角が 2.0×10^{-3} rad を越えるとはほぼ完全な降伏状態を示している。このことは先に述べたように模型回転角が増大すると模型縁部の土圧が増大し、中心線付近での反力の受け持ち分があまり増えないことと対応している。なお矩形断面模型においても円形断面模型とほぼ同様の傾向にあることが確かめられた。

振動土圧の水平方向の分布について正方形断面模型による結果を図示したものが Fig. 8 である。同図は基礎模型前面における中心線の片側について示したものである。乾燥砂において模型回転角 φ_m が $\varphi_m = 2.0 \times 10^{-3}$ rad なる一定値をとるときの土圧分布を、加振振動数をパラメーターとして表わしたものが同図 (a) である。振動数により若干の差はあるが、その分布形は模型縁部と中央部で大きな値を示し、両者の中間部では少し小さくなるという W 字型を呈している。湿潤砂における結果 (同図 (b)) は乾燥砂の場合とは異なり、ほぼ一様の土圧を持つか、あるいは中央部と縁部の中間部でピークを持つ形である。次に加振振動数を一定に保ったまま模型回転角をパラメーターにとり図示したものが図 (c), (d) である。模型回転角が増大するにつれ乾燥砂では縁部での振動土圧の増加が著しいが、湿潤砂においては水平方向にほぼ平均した土圧が現われている。なお矩形断面模型についても正方形断面模型とほぼ同様の傾向が認められた。しかし振動土圧の値そのものは同一回転角においては矩形断面模型の方が大きい。

Photo. 1 は模型頂部での変位と加速度をそれぞれ横軸、縦軸にとって図示したものである。模型頂部での加速度 (以後これを応答加速度と呼ぶ。) と復元力モーメントは時間的な変化がほぼ相似形であると考えられるから、写真は模型の回転角と復元力モーメントの関係を示していると考えてよい。ただし復元力モーメントをこのようにして図示する方法には、その相似比の決定法や、加速度計自身の持つ位相特性が補正されていないという点にやや問題があるが、復元力モーメントの動きの概略を簡単に把握することができるという特徴がある。写真のうち (a) ~ (c) は乾燥砂中の円断面模型のもので、5Hz と 10Hz の図はともに摩擦の効いたスリップ型となっている。一方 17Hz では直線に近く、履歴のふくらみも薄くなっている。これを等価減衰定数 h_e の形にして表わしたのが Fig. 9 である。図 (a) より h_e は 18% から 4% へと振動数により大きな変動を示している。Photo. 1 (d) ~ (f) は湿潤砂中の正方形断面模型のものであるが、いずれも摩擦の効いたスリップ型である。先の写真と比較するとより摩擦が効いていると言える。このときの h_e が Fig. 9 (b) であり、先の結果と同様、加振振動数の増加に対し減少しているが、その変動は小さい。

振幅漸变的正弦波実験より得られる模型の復元力曲線の最大点曲線を Fig. 10 に示した。なお同図には

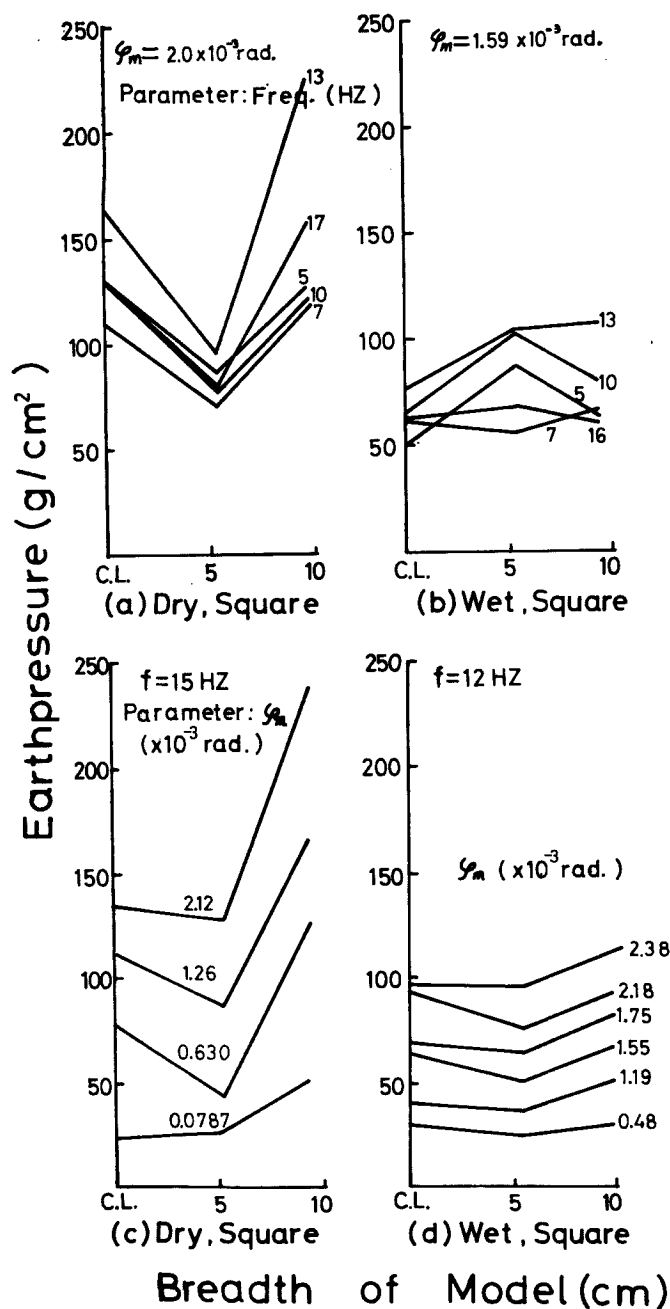
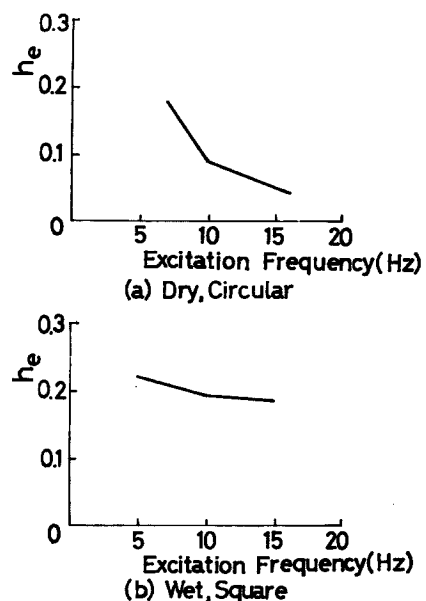
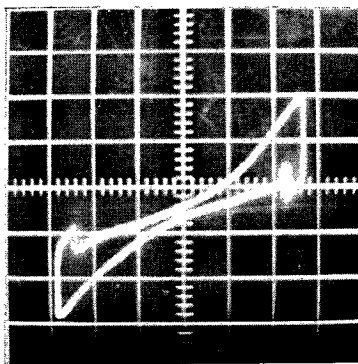
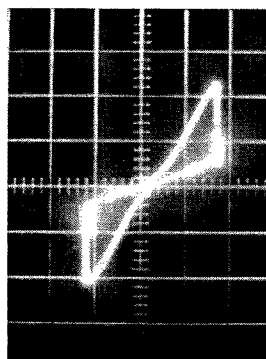


Fig. 8 Horizontal distributions of earthpressure.

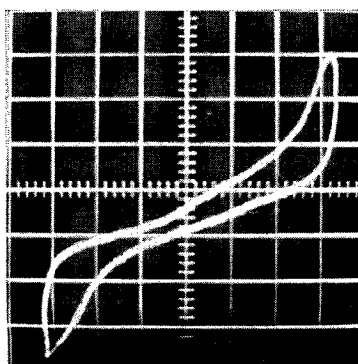
Fig. 9 Hysteresis damping factors h_e .



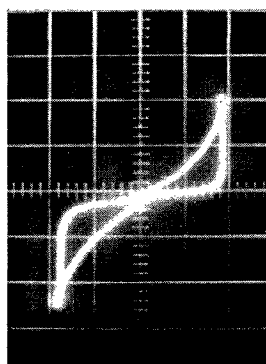
(a) Dry, Circular, 5 Hz
 $X=1.4$, $Y=455$



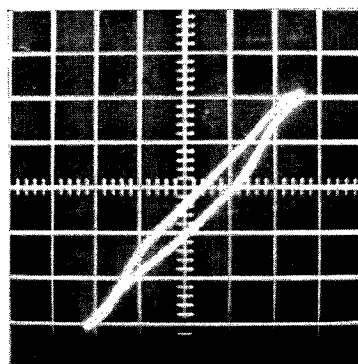
(d) Wet, Square, 5 Hz
 $X=0.8$, $Y=227$



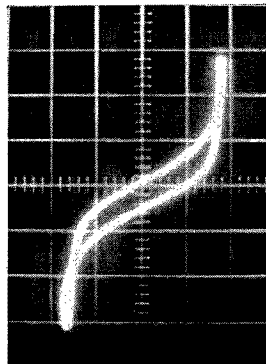
(b) Dry, Circular, 10 Hz
 $X=1.1$, $Y=208$



(e) Wet, Square, 10 Hz
 $X=0.8$, $Y=333$



(c) Dry, Circular, 17 Hz
 $X=1.6$, $Y=667$



(f) Wet, Square, 15 Hz
 $X=0.8$, $Y=333$

Photo. 1 Relation between restoring moment and rocking angle of model excited by sinusoidal wave, X ($\times 10^{-8}$ rad), Y (gal); distances between meshes scaling the ordinate and abscissa, respectively.

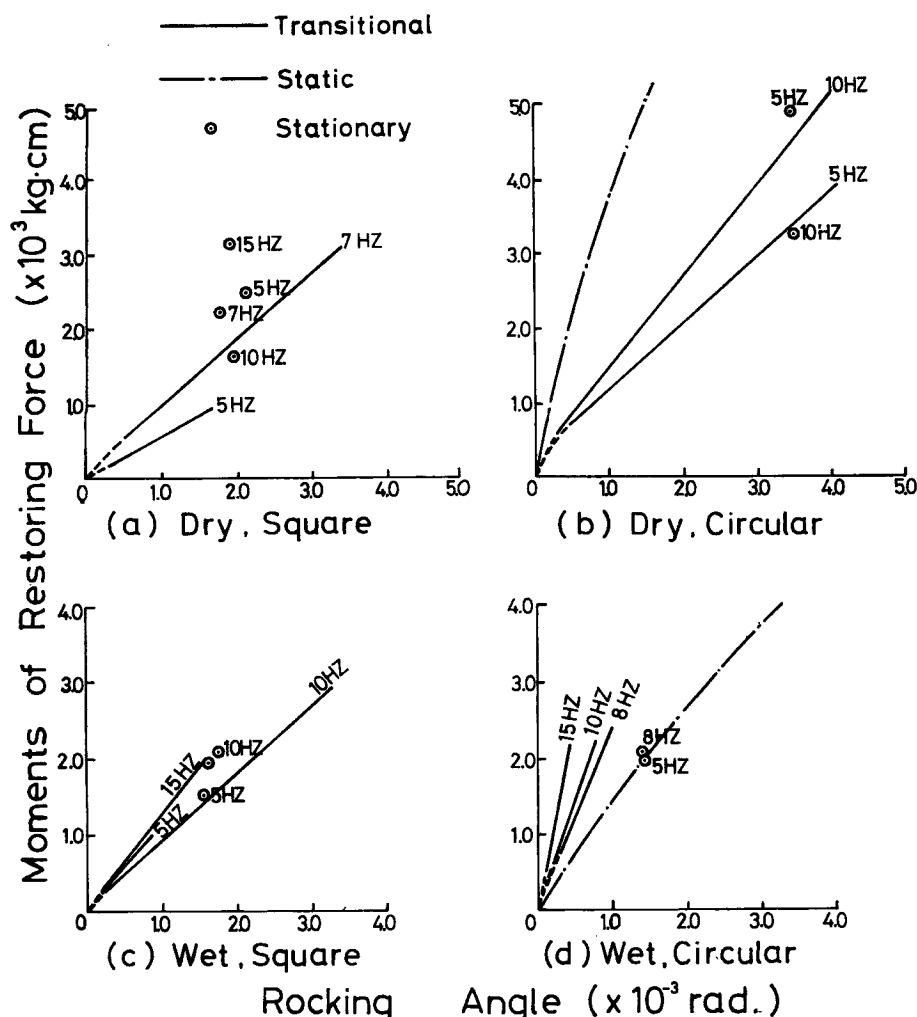


Fig. 10 Maximum lines of hysteresis curve.

静的載荷実験と定常正弦波加振実験より得られた結果も合わせて図示した。振幅漸变的加振による結果より、いずれの場合にもこの曲線は原点付近では軟化ばね型を示しているが、全体としては直線とみなすことができる。すなわち復元力モーメントは履歴を描くが、最大点曲線のみに注目すると模型回転角とは線形の関係にあると言える。加振振動数が増加すると最大点曲線の傾きはほとんどの場合大きくなり、見掛けの剛性が増加しているが、静的載荷実験の曲線とは連続している場合もあればそうでない場合もある。このことは実験順序による地盤の締め固まり具合の相違にも一原因があるものと考えられる。定常正弦波による結果は各図ごとにほぼ一定の模型回転角を表わしているが、データの少ないこともあって加振振動数と復元力モーメントとの傾向は把握し難い。弾性波動理論によれば、地盤のばね剛性は加振振動数の増加に対して減少する傾向にあるとされているが、本実験の場合土槽壁からの反射波の影響もあるので詳しいことはわからず、今後さらに実験的に検討していかねばならない課題である。

次に水で飽和された砂地盤中に根入れされた構造物基礎に正弦波形を作用させたときの水圧についての結

果を考察する。現在までに水中にある構造物や擁壁に作用する地震時の動水圧や過剰間隙水圧に関し、理論的・実験的な研究成果がかなり得られている^{4), 5)}。ここではロッキング振動をする構造物基礎に作用する間隙水圧を取り扱う。Fig. 11 は湿潤砂層中に根入れされた正方形断面模型に作用する水圧 U_2 および U_3 の共振曲線であり、土圧 P_3 と模型回転角 φ_m の結果も合わせて図示してある。なお入力加速度は 100 gal (一定) である。 φ_m の共振曲線から明らかなようにこのときの模型の共振振動数は約 12 Hz である。土圧 P_3 においては共振のピークが顕著に現われているが、水圧 U_2 , U_3 には明らかなピークは見られず、共振振動数よりやや高い振動数 13 Hz ~ 18 Hz 付近でなだらかなピーク形状を呈している。 P_3 と U_3 はほぼ同じ深さにおける値であるが、両者のピーク値同士を比較すると P_3 は U_3 の約 7.5 倍となっている。ただしこの場合の土圧には水圧も含んでいるが、土圧と水圧の位相差などを考えずに単純に土圧から水圧を差し引き、真の土圧と水圧の比をとると約 6 倍となる。いずれにしても地震時に、飽和砂中の構造物に作用する地盤の反力は大部分土圧が受け持っていることになるが、共振振動数以上の高い加振振動数においては水圧の占める割合が若干大きくなることが知られる。

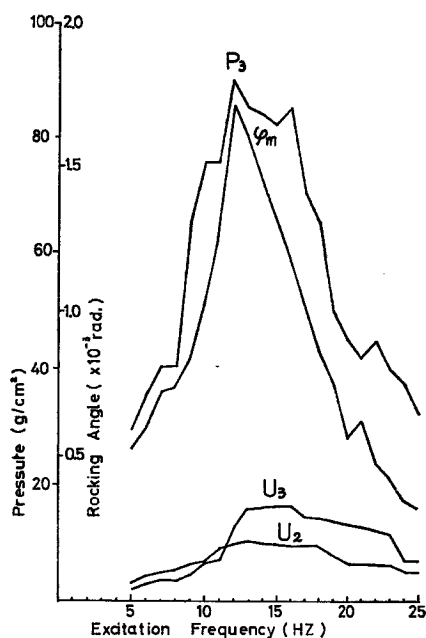


Fig. 11 Frequency response curves, wet, square.

Fig. 11 における U_2 , U_3 と模型回転角との関係を図示したものが Fig. 12 である。図は正方形断面模型のもので、振幅漸变的正弦波加振の結果である。各加振振動数ともに、ほとんどの模型回転角の範囲において U_3 の値の方が U_2 より大きい。なお模型回転角が大きくなると水圧の増加の割合は小となり、土圧と同様にやや非線形性を示しているのが注目される。

以上においては、模型底部にヒンジを取り付けロッキング振動のみを許す場合についての実験結果を示した。しかしながら実構造物基礎においては多かれ少なかれ並進とロッキング振動の重なり合った振動をすることが予想される。そこで矩形断面模型底部のヒンジを取り去り、以上に見てきたヒンジのある場合との比

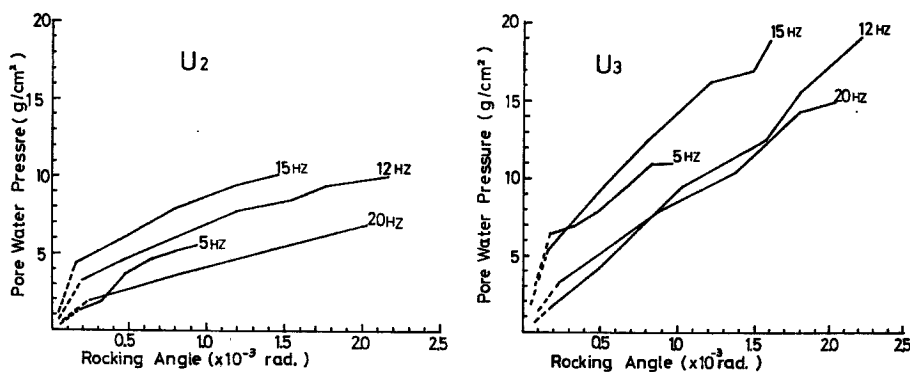


Fig. 12 Relation between dynamic pore water pressure and rocking angle of model, wet, square.

較を、主として振動土圧の深さ方向の分布に注目して行なった。Fig. 13 に湿潤状態における振幅漸变的正弦波加振時の結果を示した。この場合の固有振動数は約 70 gal の Sweep Test において約 8 Hz であるので、図の加振振動数は 8 Hz に設定した。なおヒンジを取り去ると、模型は並進とロッキング振動の重なった複雑な動きをするので、各点の土圧の位相は少しずつずれているが、図には各点の最大土圧を示している。とりわけ模型底部付近の土圧が他の土圧と位相が逆転しており、ヒンジのついている場合の分布 (Fig. 5) とは大きく異なっている。土圧が 0 となる点は実験によりややばらつきがあるが、湿潤状態では模型下端から約 8 cm 上位にある。本実験においては土圧 0 の点の高さが必ずしも回転中心とはならないが、図には参考のため一応その点を回転中心として模型回転角を記してある。

乾燥状態における振幅漸变的正弦波加振の結果が Fig. 14 である。湿潤砂における分布と比べると同一回転角に対する値は乾燥砂の方が大きい。また分布形は湿潤砂の三角形分布からはかなりはずれ砂の表面に近いところでの土圧が大きい形状を呈している。なお分布形状は加振振動数によりかなり異なっていたが、このことより振動モードが振動数により大きく変化していることが予想される。

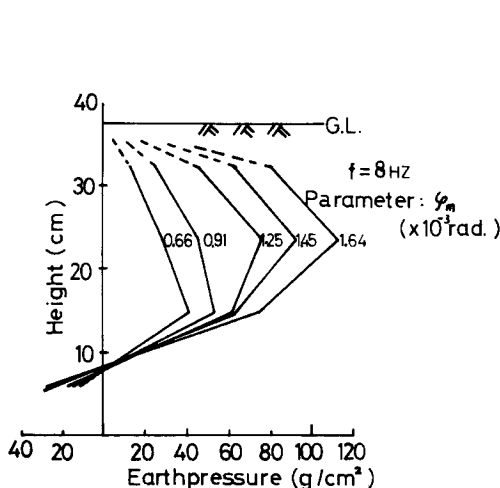


Fig. 13 Vertical distributions of earthpressure, wet, rectangular, without hinged bottom.

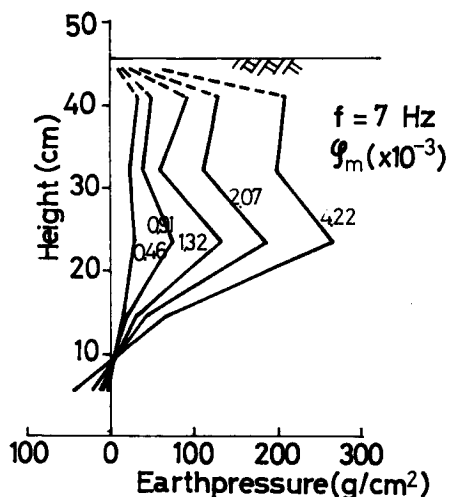


Fig. 14 Vertical distributions of earthpressure, dry, rectangular, without hinged bottom.

5. ランダム波加振実験の結果

本節では実地震動のようにランダムな波形が構造物基礎に作用するときの挙動について考察を加える。一般に地震波形は正弦波と異なり振幅や振動数が時間的に不規則に変動するので、そのような波形が入力として作用するときの応答もやはり不規則な挙動を呈する。ところで前節に見たように、例えば復元力モーメントの最大点曲線からも明らかであるが、振幅漸变的正弦波加振時の応答の傾向は定常的正弦波加振によるそれと必ずしも一致しない。ランダムな入力はこの振幅漸变的正弦波よりも振幅の時間的変化が速い上に、さらに振動数の変化も加わる。このように地震動が構造物に与えるエネルギーは時間的に不規則に変化するので正弦波の結果から推定され得ない現象が生ずることも予想される。本節においては前述のノイズ A とノイズ B を模型に作用させ、ランダム振動の解析において重要な役割を果たす自己相関関数とスペクトル密度を用いて得られた結果に検討を加えた。なお自己相関関数とスペクトル密度はそれぞれ相関器 (日本科学工業製, SAI-42), スペクトルアナライザー (SD 社製, SD 1003-24) を用いて演算を行なった。

Fig. 15 は湿潤砂地盤に根入れした円断面模型の入力加速度 A_s と応答加速度 A_m のパワースペクトル密度を示したものである。入力加速度の標準偏差は図の (a), (b) とともに 50 gal であるが、スペクトル密度は異なり (a) は 8Hz~12.5Hz の振動数成分のみからなるノイズ B であり, (b) は 5Hz~50Hz の振動数領域の成分をほぼ均等に含んでいるノイズ A である。両図ともに 20 数 Hz 付近に応答加速度のピークもしくは第 2 のピークが見られるが、ペンレコーダーの記録や実験時の観察からこの場合の模型の固有振動数は約 16 Hz であり、スペクトル密度がピークとなる振動数が必ずしも模型の固有振動数とはならない場合もあることがわかる。なおこの 20 Hz 付近のピークは矩形や正方形断面模型の場合にも多かれ少なかれ存在するものであり、地盤または土槽の固有振動数であろうと考えられる。さて図の (a) は入力加速度のスペクトルが模型の共振振動数より低領域で成分を持つランダム波であるが、応答加速度のスペクトルは入力加速度のそれとほぼ同じ形をしている。このことは模型の固有振動数は、入力地震動の持つスペクトル特性の影響を受け、その卓越振動数に近づく傾向のあることを意味している。なおホワイトノイズに比較的近いノイズ A による加振においては、構造物基礎—地盤系の振動特性がかなり良く現われている。

Fig. 15 と同様の内容を自己相関関数を用いて表わしたものが Photo. 2 である。写真は乾燥砂中の円形断面模型に標準偏差がともに 50 gal のノイズ A とノイズ B とを作用させたときの入力と応答の加速度である。ノイズ A の自己相関関数は遅延時間 $\tau=0$ で 1 なる値をとるが、 τ が 0 より大きくなると急激に減衰して

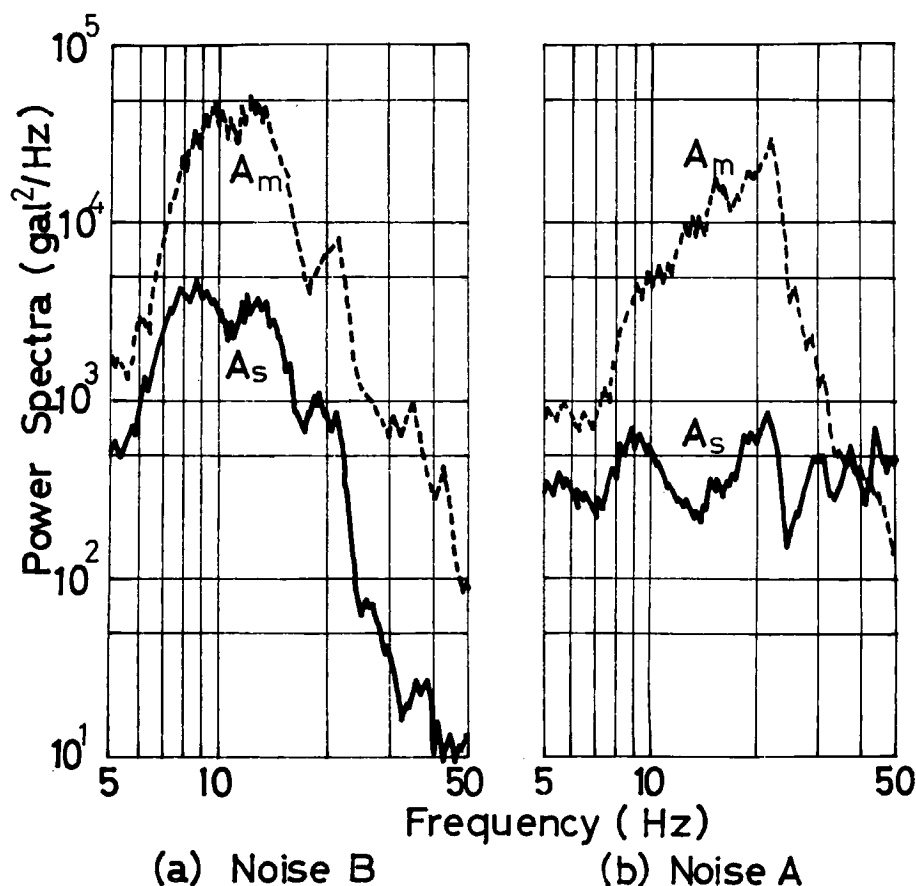
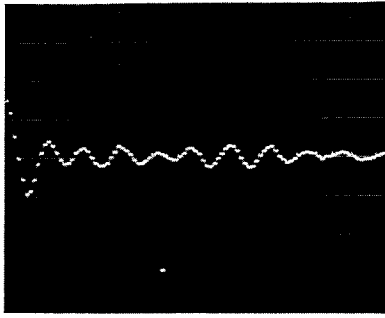
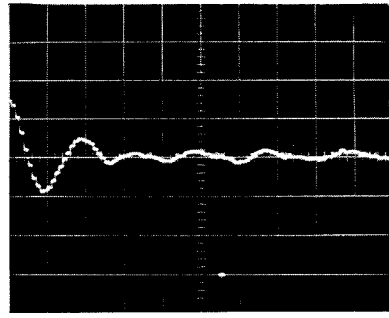
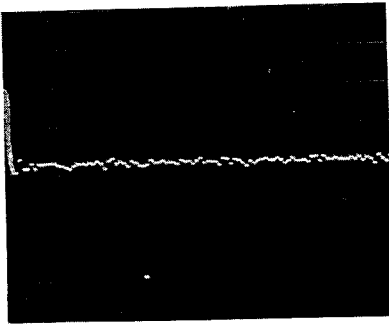
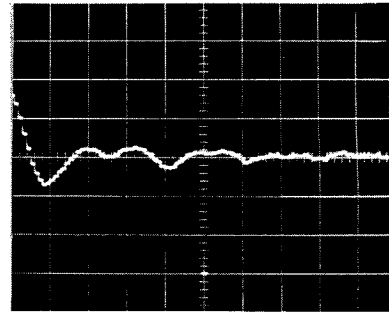


Fig. 15 Power spectra, wet, circular.


 A_m

 A_m

 A_s

 A_s

(a) Noise A

(b) Noise B

Photo. 2 Auto-correlation functions, dry, circular (distance between meshes scaling the ordinate is 0.05 sec.).

おりノイズAに近いことが確認される。ところがその応答加速度の自己相関関数は約0.05secの周期(20Hzの振動数)を持っているが、この値はこの状態の模型の固有周期と一致している。このことからノイズAのように振動数に対して一様なエネルギーを持つ入力に対して、構造物基礎はその固有周期近くで振動することが確認される。このことはよくいわれるように構造物基礎がバンドパスフィルタのような挙動を呈することを意味する。ノイズBの自己相関関数は0.08 sec (12.5 Hz) 付近の周期で振動しており、ノイズAのそれに比べるとかなり正弦波に近い。また応答加速度の自己相関関数は入力のそれに近いが、他の結果によれば模型の固有振動数付近の周期もかなり強く現われる。これらのことはスペクトルの図から考察される結果とよく一致している。

Fig. 16 は入力加速度の大きさが応答に及ぼす影響を図示したものである。図は湿潤砂中に根入れされた円断面模型にノイズAを作用させたときのもので、破線は入力加速度の標準偏差が50galのノイズ A_1 に対する応答加速度のスペクトルであり、実線は同じく80galのノイズ A_2 に対するものである。入力レベルが大きくなるとともに応答のスペクトルのピークは振動数の低い方へ移動している。このことは構造物—地盤

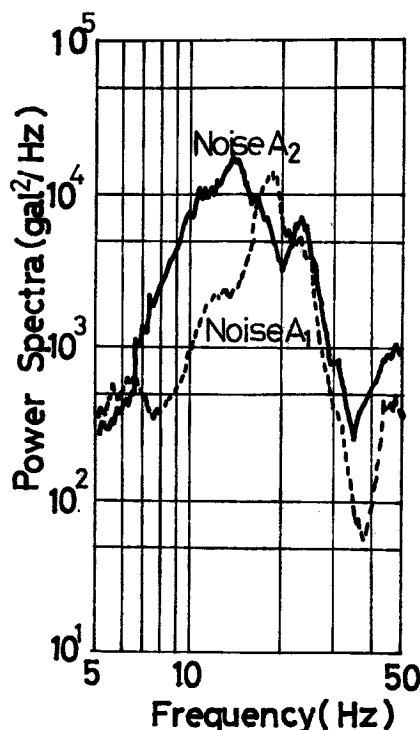


Fig. 16 Power spectra, wet, circular.

系の復元力が軟化ばね型の非線形性を有しているということと対応している。また両ノイズの標準偏差の比は約1.6であるが、応答の標準偏差の比は約1.2となっており、このことは復元力による履歴損失が入力レベルの増加とともに増大しているからであろうと考えられる。

地盤の湿潤状態の違いが応答に与える効果を比較したものが Fig. 17 である。両図はともに円形断面模型に標準偏差 50gal のノイズ A を作用させたときの応答のスペクトルであり、乾燥砂に比べて湿潤砂における共振振動数が数 Hz 低い方へ移動しており、そのレベルも全体的に低下している。これらのことは砂が水を含むとその剛性は低下し、減衰力は増大するという理由によるものと考えられる。

なお本実験で使用した振動台は二方向に加振することが可能であるので、Fig. 16 と Fig. 17 のみ他の図における振動方向とは 90° 回転した方向で加振した結果を示した。この両図も含めてほとんどの実験は両振動方向で加振したが、いずれの場合にも両方向の結果は定性的にはよく一致していた。

ところで構造物—地盤系の復元力曲線は以上見てきたように、たとえ模型の回転角が微小であっても非線形性を呈し、履歴を描くことがわかった。このような履歴を有する非線形系にランダム波が作用すると、その応答変位の中立軸が一方に流れ、外力が停止しても振動系は振動中立位置に戻らないという事実が主として数値計算結果において示されている。本実験においても土槽中に砂を入れた直後や、模型の種類を変えるために砂層を掘り返したりした後では、加振中に模型が一方へ傾くという現象は見られた。しかし地盤を締め固めてからの実験においてはこのような傾向はランダム加振中にも全く見られなかった。これは振動台上の砂層は時間とともに十分に締め固められるということや、本実験における復元力曲線は線形範囲を越えてもその剛度が著しく小さくなるということがないなどの理由によるものと考えられる。

なお断面形状の異なる 3 種の模型に同じ内容の実験を順次実施したが、その結果は定性的にはほとんど変

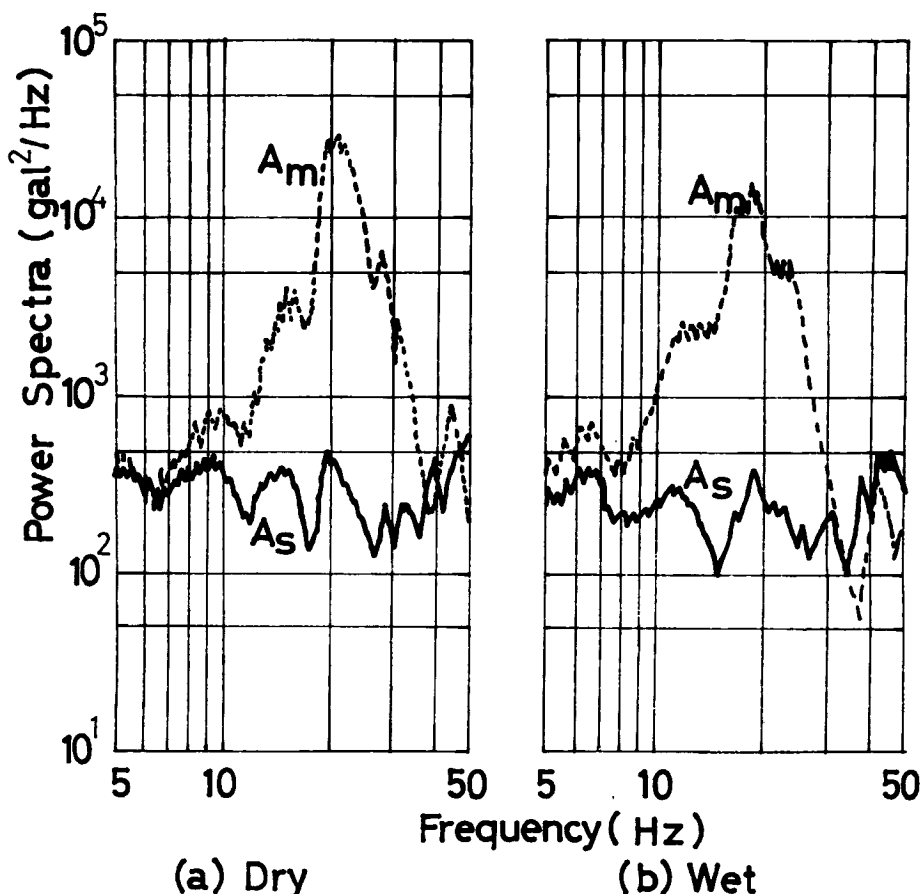


Fig. 17 Power spectra, circular, noise A.

わらなかった。定量的には若干の違いが見られたが、実験順序や一つの実験の前後における砂の間隙比の変化、さらには模型の慣性モーメントなどの諸元の差などによっても応答は異なってくることが予想される。したがって例えば、どの断面形状の模型がゆれやすいかという課題に対する十分な解は得られなかった。

以上に見たように、ランダム波入力が入力されても構造物の応答はかなり周期化されるので、正弦波加振実験より得られる情報はランダム波加振時にもかなり有効であると言える。

6. 結 論

地震波のようにランダムな波が作用したときの構造物基礎の挙動を把握するために、構造物基礎模型を振動台上の砂層地盤に根入れし、静的載荷実験、正弦波（定常的、振幅漸变的、定振幅）加振実験およびランダム波（比較的広帯域ノイズ、比較的狭帯域ホワイトノイズ）加振実験を実施した。模型の断面形状は円形、正方形、矩形の3種類であり、砂地盤は乾燥状態と飽和湿潤状態の2種類に変えた。得られた成果を要約して列挙すると以下のようである。

(1) 静的載荷実験より得られる復元力の最大点曲線は軟化ばね型の傾向を示すが、この傾向は乾燥砂よりも湿潤砂において強く現われる。またいずれの砂地盤状態においても円形断面模型のばね剛性の方が矩形断面模型のそれよりも軟らかい傾向にある。

(2) 構造物基礎が1自由度のロッキング振動のみをする場合、作用する土圧の深さ方向の分布は含水状態にかかわらず根入れ深さの中央部付近で最大点を持つ三角形ないしは放物線状となる。矩形と正方形断面の模型に作用する土圧の水平方向の分布は、乾燥砂においては模型縁部と中央部で大きな値を持つW字型となる。湿潤砂においてはややこの傾向が弱まり、一様な分布に近づく。以上に述べた分布形状は加振振幅や加振振動数によってかなり変化する。

(3) 矩形断面模型底部のヒンジを取り除き2自由度としたときの土圧は各点において位相が少しずつており、模型底部付近においては位相が逆転している。深さ方向の分布は湿潤砂の場合は三角形分布であるが、乾燥砂の場合には砂層表面における値が大きくなる。

(4) 正弦波加振時の模型回転角と復元力モーメントの関係はいずれも摩擦の効いたスリップ型の履歴ループとなるが、加振振動数の増加とともにループの囲む面積は小さくなる。この傾向を等価減衰定数で調べると、等価減衰定数は加振振動数の増加に対し減少する。

(5) 飽和湿潤砂中に根入れされた構造物基礎に作用する振動時の水圧は土圧の数分の1倍以下であり、構造物に作用する地盤の反力は大部分土圧が受け持っていることになる。また水圧の共振曲線は模型の共振振動数よりやや高い振動数付近でなだらかなピーク形状を呈する。

(6) ランダム波が作用すると地盤—構造物基礎系がバンドパスフィルターのような挙動を呈することが確かめられた。またある振動数範囲のみにエネルギーを有するようなランダム波が作用すると、構造物の共振振動数はその振動数範囲の方に近づく。なお時間とともに振動台上の砂地盤は締め固められるということや、線形範囲を越えても復元力の剛度が著しく小さくならないなどの理由によるものと思われるが、ランダム波加振中にも応答変位の中立軸が一方方向に流れるという現象は見られなかった。

以上のような研究成果が得られたが、本実験においてはつぎに示すような課題が問題点として残されている。

(1) ロッキング振動を支配する係数（例えばロッキング中心まわりの模型の慣性モーメント）を同一にし、その断面形状のみが異なる模型を用いて、断面形状の相異が応答に及ぼす影響について検討を加えること。

(2) 復元力を正確に把えうる方法を開発し、正弦波加振時はもとよりランダム波加振における復元力曲線の動きを知ること。このことにより、実験結果の普遍化に重要な役割を果たす地震応答計算時の制御法が明らかとなる。

(3) 加振方向の違いによる応答の相違について実験的に追求すること。

以上に述べた点を中心に、今後も引き続いて実験的ならびに理論的研究を積み重ねていく予定である。

最後に本研究実施にあたり多大の便宜を与えられた本学防災研究所の地盤震害部門、耐震基礎部門ならびに本学土木工学教室の橋梁工学研究室の関係各位に謝意を表わす次第である。また本研究の一部は文部省科研費補助金（自然災害特別研究）および本州四国連絡橋公団の委託研究費の援助を受けたことを付記する。

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，第194号，1971.11，pp. 1-11.
- 2) 後藤尚男・北浦 勝・宮脇幸治郎：砂層中に根入れされた構造物基礎の動的挙動に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第219号(1973.11)登載予定.
- 3) 後藤尚男・吉原 進・北浦 勝・太田昭弘：構造物基礎の水平復元力特性に関する実験的研究，京都大学防災研究所年報，第14号A，1971.4，pp. 283-299.
- 4) 土岐憲三：構造物基礎の地震応答に関する研究，京都大学博士学位論文，昭44，pp. 3-14.
- 5) 石井靖丸・土田 肇・古部哲兵：振動時の飽和砂の土圧と間隙動水圧に関する研究，港湾技術研究所報告，2巻2号，1963，pp. 25-71.