

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

EXPERIMENTAL STUDY ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF THE STRUCTURAL FOUNDATION EMBEDDED IN SAND LAYER

後藤 尚 男*・北 浦 勝**・宮脇 幸 治 郎***

By Hisao Goto, Masaru Kitaura and Kojiro Miyawaki

1. ま え が き

近年土木構造物は長大化、大型化の傾向にあるが、同時にまたその立地場所は良好な地盤のみならず、軟弱な地盤へと領域が広がられつつある。このような地盤に建設される構造物の設計に当っては、外力や構造物の強度を想定するとき慎重な検討が必要であるが、とりわけ地盤にとり囲まれ地震を直接に受ける構造物基礎の耐震性はわが国の場合きわめて重要である。これらの設計においては従来経験的に、また簡便さのゆえに震度法や修正震度法が用いられてきたが、これまでの震害や理論的研究の進展とともに、これらの設計法は必ずしも実状にそぐわないことが指摘され、動的耐震設計法の確立を目指して研究が進められている。

現在までに構造物の動的挙動に関して理論的ならびに実験的研究が実施されて、かなりの成果があげられつつある。たとえば、構造物—地盤系をばね—ダッシュポット系にモデル化して、非線形復元力の領域にまでその応答が解析的もしくは数値計算によって求められている。また、構造物をとりまく地盤を弾性体とみなし、波動論の考えに立って構造物の周波数応答特性や不規則波に対する応答も解析されている¹⁾。実験的な研究としては室内模型実験、実地盤上模型実験、実物実験および実地震時における実測などが実施され、構造物基礎の動的挙動がかなり明らかにされつつある²⁾。著者らもすでに実物大もしくは模型の構造物基礎を、実地盤ならびに振動台上の模型地盤中に根入れさせて、起振機や振動台で加振することにより、構造物基礎体—地盤なる系の振動特性、構造物に作用する振動土圧、復元力特性などについ

ての基礎的な研究を行ってきた³⁾。

しかしながら、まだ現象的に実験を通じて追求すべき点も少なくない。その1つに実砂地盤やモデル地盤としての砂地盤の含水比の相違が、構造物の応答にいかなる影響を及ぼすかという課題がある。地盤中の間げきを埋めている水は地震時には土圧とともに間げき水圧となって、構造物に作用することになる。したがって、たとえ構造物基礎の底面が堅固な岩盤上に設置されていても、基礎体を取りまく地盤の含水状態によってその振動特性が異なり、耐震安定性にも相異なる影響を及ぼすものと考えられる。それゆえ、乾燥状態の砂に根入れされた構造物の挙動と同時に湿潤砂における応答にも注目しなければならない。

もう1つ実験的に解明されるべき課題に、ランダム波が人力として作用したときの構造物の応答がある。地震力のように時間的に不規則な外力が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らず、当然のことながら不規則な挙動を示す。ところが、従来の研究においてはほとんどの場合、地震波を最も単純化した正弦波による加振実験がなされている。正弦波による構造物の加振と地震波のように不規則な波による加振とで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、これらを総合した地盤反力および構造物の動的応答特性などにかかなりの差のあることが予想される。

このようなことから本研究では、基礎的定性的な研究に重点をおいて、構造物基礎模型を砂地盤に根入れさせて大型ランダム振動台上に設置し、それらに正弦波ならびにランダム波による加振を与えて実験を実施し、得られた結果について考察を加えた。なお地盤の含水比を5段階に変え、各段階において以上の実験を繰り返し、応答の様相について調べた。

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部交通土木工学教室

** 正会員 工修 京都大学助手 工学部交通土木工学教室

*** 正会員 工修 大阪府立工業高等専門学校 講師 土木工学科

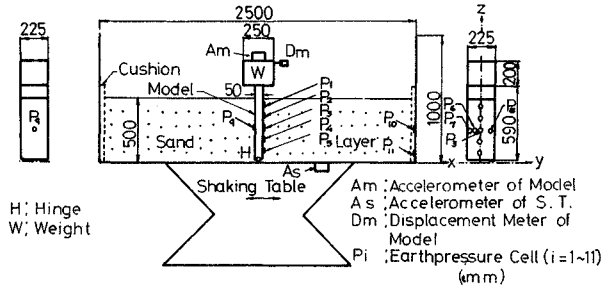


Fig. 1 General View of Experiments

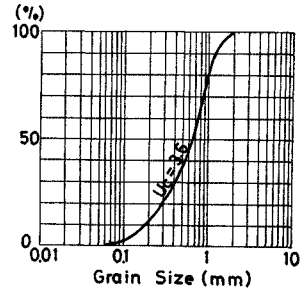


Fig. 2 Grain Size Distribution Curve

2. 実験装置および実験方法

本研究においては基礎的定性的な実験に重点をおき、基礎地盤系の動的挙動特に砂地盤の含水比の影響に注目し、しかも現象をなるべく簡明的確に把握するために、供試模型を次のように定めた (Fig. 1)。

1) 構造物基礎体は鋼製の矩形断面とし、全体として剛体とみなせるようにたわみの無視できる寸法とした。これがほぼ剛体であることは、抵抗線ひずみ計による振動測定ひずみのかなり小さいことから裏付けられた。

2) 現象を単純化するため模型底面中央にヒンジを取り付け、回転運動のみが可能な1自由度系とした。また上記1)のような模型全体が振動時にもほぼ剛体とみなせる範囲内において、底面の地盤反力と側面の摩擦力をなるべく小さくするように振動方向の断面幅を定めた。

3) 地盤の模型としては砂地盤の含水比に注目していることから、原寸大の川砂を用いて砂層模型とした。

このような模型実験では、原型との対応すなわち相似性が重要であるが、それが十分わかっておらず、しかも本研究では特定の原型を想定せず、あくまでも基礎的定性的な実験に重点をおいたので、原型との対応は明らかでない。なお模型底面のヒンジを取り外した場合の実験を現在準備中である。

基礎模型には、深さ方向および根入れ中央部の水平断面における振動土圧 (静止土圧からの振動による変動分の土圧) を測定するために、土圧計 P_i ($i=1\sim 9$) (共和電業製, BE-2 KC, 最大 $\pm 2 \text{ kg/cm}^2$) を接着した。また基礎模型 (重さ約 31 kg) 頂部には、上載荷重として重錘 (約 88 kg) 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-5 G, 最大 $\pm 5 \text{ G}$) および基礎模型の回転角を測るための変位計 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。さらに入力加速度を計測するために、基礎模型に設置したものと同一の加速度計 A_s を振動台に取り付けた。

次に、砂層の砂としては 2 mm ふるいを通過した

Table 1 State of Sand Layer

States of Sand Layer	Dry (D)	Wet (W)				
		W_1	W_2	W_3	W_4	
Bulk Density ρ	1.76	1.65	1.67	1.68	1.69	
Water Content w (%)	0.5	15 cm depth	5.8	7.0	16.6	20.8
		30 cm depth	5.9	12.6	20.8	24.6
Void Ratio e	0.59	0.70	0.67	0.65	0.64	

Table 2 Classification of Experiments

Input Accelerations	Dry State			Wet State	
	Stationary	Transitional	Sweep	Noise A	Noise B
A_s : Excitation Acceleration (gal) Speed Mode in Sweep is Log			$S(f)$: Power Spectral Density (gal ² /Hz)		Same as Dry State

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 $D_{10}=0.19 \text{ mm}$) 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 1)。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、これを振動台に載せて 200~250 gal (約 20 Hz) の加速度で約 1 時間加振し、十分に締め固めて厚さが約 50 cm の砂層地盤となるようにした。乾燥砂地盤においては、砂地盤と土槽の境界に 50 mm 厚さのウレタンフォームを貼り付け、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、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 日放置してから実験を行なった。含水比などは土槽内の 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-91 T 型, 最大上載荷重 5 ton, 最大変位 $\pm 50 \text{ mm}$, 最大加振力 4 ton G) を用いて Table 2 に示すような入力加振による実験を行なった。

(1) 正弦波加振 (Table 2 の左半参照)

a) 定常的正弦波加振: 入力としての正弦波の加速度

(gal) と振動数 (Hz) を設定したのち、応答加速度が定常的と思われる状態 (約 2, 3 分後) で加振する。あるいは、応答としての基礎模型の回転角 (rad.) と入力振動数 (Hz) を設定し、設定された回転角が得られるように入力加速度の振幅を定めて加振する。

b) 振幅漸变的正弦波加振：入力正弦波の振動数を設定し、入力加速度の振幅を 0 からあるレベルまで漸次増加させる状態 (約 15~30 sec) の加振をいう。

c) 定振幅加振：加振振動数にかかわらず、入力正弦波の加速度振幅が一定となるような加振方法で、入力振動数の低い (高い) ところから漸次高い (低い) 領域に振動数を掃引させる。

(2) ランダム波加振 (Table 2 の右半参照)

a) 比較的広帯域ノイズ (ホワイトノイズ)*加振：入力加速度のパワースペクトルが全振動数領域にわたって一定であるようなランダム波による加振のことで、本実験ではパワースペクトルの代りにフーリエスペクトルによって操作した。

b) 比較的狭帯域ノイズ**加振：入力加速度のパワースペクトルがある振動数帯域で一定値となり、その他の振動数成分を持たないような定常ランダム波による加振のことで、上述のノイズAの場合と同様にフーリエスペクトルによって操作した。

上述のように振動台の作動を制御して、以下に記す測定順序にしたがって実験を実施し、得られた記録を解析した。まず測定しようとする量 (土圧, 加速度, 変位など) をピックアップを通じて電気的信号に変える。土圧計および加速度計により得られる信号に対しては、動ひずみ計 (新興通信工業製, DS 6/MTX. および共和電業製, DPM-6 G) を用いてホイートストンブリッジを組み、電圧を適当に増幅させる。一方、変位計に対しては、専用の増幅器および DC アンプ (渡辺測器製, WA 211) により電圧を増幅させる。これらの測定量をスイッチボックスでブラウン管オシロスコープ (松下電子製, VP-541 A), データレコーダ (TEAC 社製, R 351), ペン書きレコーダ (渡辺測器製, WTR-211 型) に分岐する。ブラウン管オシロスコープでは、応答加速度と応答回転角との関係より、復元力特性などを写真に記録する。データレコーダには、主としてランダム波加振時の振動土圧, 加速度および変位などを記録し、相関分析器 (日本科学工業製, SAI-42) あるいはパワースペクトル解析器 (スペクトラル・ダイナミック社製) を用いて確率統計的な解析をする。ペン書きレコーダには、おもに正弦波加振に対する振動土圧, 加速度および変位などを記録して、一般の復元力特性に関する解析に用いる。

* ** 以後それぞれノイズA, ノイズBと呼称する。

3. 正弦波加振実験の結果

Fig. 3 は、正弦波加振したときに基礎模型に作用する振動土圧の鉛直分布を示す。砂地盤は湿潤状態 W_2 (記号 W_i は Table 1 参照), Fig. 3 の (a) は定常加振に対する結果であり、(b) は振幅漸变的加振に対する結果である。この状態で入力加速度レベルを 100 gal 一定としたときの模型の共振振動数は 12.3 Hz である。定常加振時の振動土圧の鉛直方向の分布形状が、加振振動数によってかなり異なるのがわかる。一方、振幅漸变的加振に対する分布形状は、基礎模型の回転角の増加とともに土圧が大きくなり、それが最大となる位置も移動しているのが見られる。このように振動土圧の鉛直分布が基礎模型の根入れ長のほぼ中央付近にピークを持つということ、基礎模型の回転による模型に接する砂の変位がヒンジからの高さに 1 次比例して増加しているということから、砂地盤の水平方向の剛性は深さに比例して増加する傾向にあると考えられる。

基礎模型に働く振動土圧の水平断面における分布形状の一例を示したのが Fig. 4 である。砂地盤は湿潤状態 W_4 であり、入力加速度を 0 gal から 200 gal まで漸次増加させたときの結果である。図より振動土圧は基礎模型の回転角の増加にしたがって大きくなり、またその水平断面における分布形状は加振振動数によりかなり変化することがわかる。たとえば、5 Hz では P_7 の位置 (Fig. 1 参照) の土圧が比較的小さいが、7, 9 Hz と加

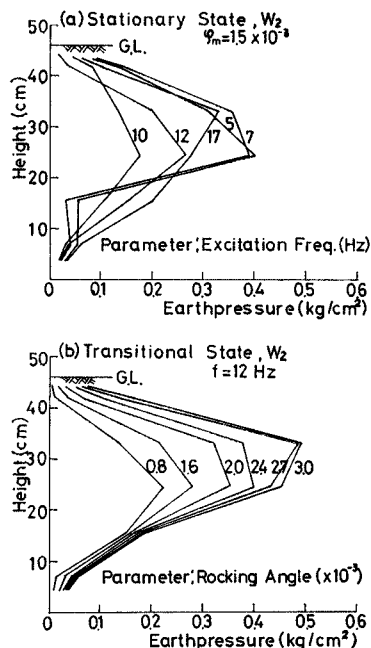


Fig. 3 Vertical Distributions of Earthpressure

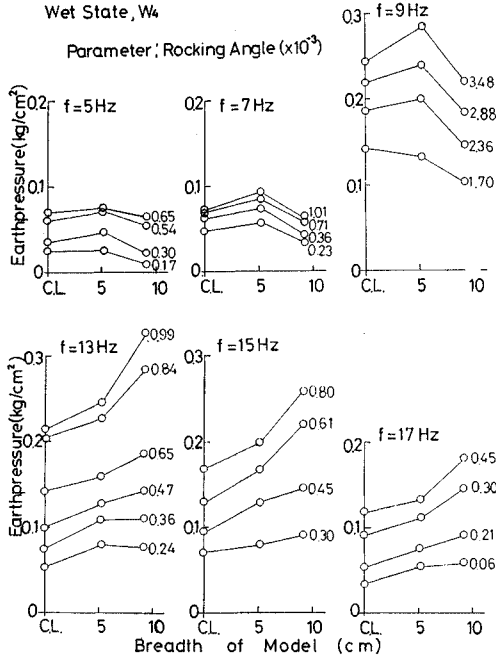


Fig. 4 Horizontal Distributions of Earthpressure

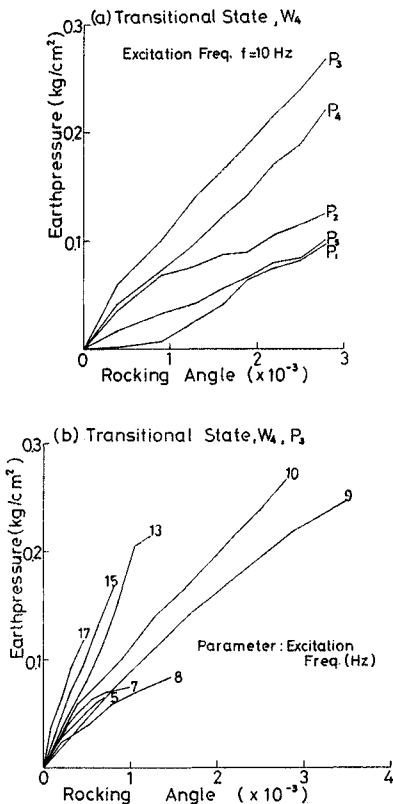


Fig. 5 Relation between Earthpressure and Rocking Angle of Model

振振動数が增大すると振動土圧の増大とともに、 P_6 の位置にピークを持つようになる。さらに 13, 15, 17 Hz となると、 P_3 でノッチとなり、 P_7 でピークとなる。また、湿潤状態 W_4 における模型の共振振動数（入力加速度レベル 100 gal のとき 11.6 Hz）付近では、応答回転角が大きくなるのでその土圧も当然増加している。さらに、共振振動数 11.6 Hz より大きい加振振動数の場合にも土圧は大きくなる。これは共振振動数以上では応答回転角は減少するが、砂地盤の剛性が増加するので、振動土圧が大きい値を示すのであろうと考えられる。

Fig. 5 は、湿潤状態 W_4 における振幅漸变的加振（最大入力加速度レベル 200 gal）時の、基礎模型に作用する振動土圧と回転角との関係を示したものである。ここに図 (a) は加振振動数が一定であるときの各深さの振動土圧であり、図 (b) はパラメータを加振振動数にしたときの模型掘入れ長のほぼ中央の振動土圧 P_3 の値を示している。図 (a) より、 P_3, P_4, P_5 の振動土圧はほぼ回転角に比例して増加しているのに対して、 P_1 と P_2 の振動土圧が非線形性を示しているのが注目される。これは、 P_1 および P_2 が砂表面に近く同一回転角に対する砂地盤の変位量が大きいので、その塑性的影響を受けやすいことや、あるいは基礎模型と砂地盤とが十分密着していない状態にあるためと思われる。図 (b) より、振動土圧と回転角との関係は、加振振動数によってかなり異なることがわかる。すなわち、加振振動数による振動土圧の特性は、大まかにみて加振振動数の高い方が、同一回転角に対する振動土圧が大きい傾向を持っている。

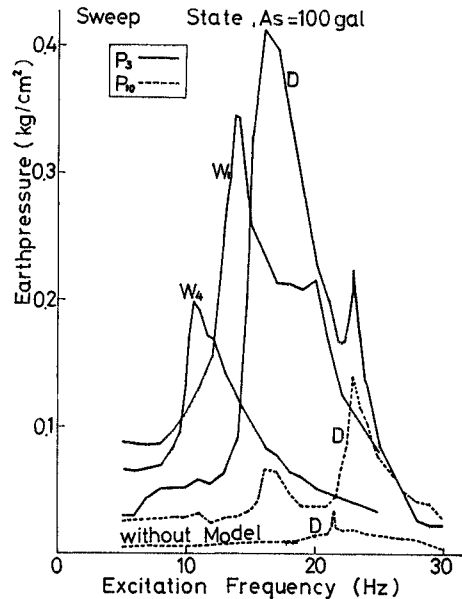


Fig. 6 Relation between Earthpressure and Excitation Frequency

Fig. 6 は、定振幅加振（入力加速度レベル 100 gal）において、基礎模型の根入れ中央部での振動土圧 P_3 または土槽の壁に設置されている振動土圧 P_{10} と加振振動数との関係を示した図である。振動土圧 P_3 は、砂地盤が乾燥状態 D から湿潤状態 W_1, W_4 へと含水比の増加するにつれてピークレベルが低下し、振動土圧がピークとなるとき振動数も下がっている。これは含水比の増加に伴う砂地盤の剛性の低下、ならびに減衰力の増大によるものであろうと考えられる。次に乾燥状態の P_3 と P_{10} の結果においては2つのピークが現われているが、基礎模型を取り除いた状態における砂槽内面に作用する振動土圧 P_{10} は、1つのピークしか持っていない。このような振動土圧 P_3 と P_{10} の挙動と、実験中の砂の動きなどから判断して、16 Hz 付近のピークが基礎模型の共振によるものであり、一方 24 Hz 付近のピークは砂層地盤または土槽の共振によるものであると考えられる。またこのことは、基礎模型が土槽の境界により影響を受けていることを示しているといえよう。

なお水で完全飽和されている状態の砂は、相対密度が小さければ 100 gal 程度の加速度入力に対して液状化の起こる可能性があるといわれている⁹⁾。しかし本実験では、すでに述べたように 200~250 gal の加速度で約1時間締め固めたのち、より低いレベル (50~150 gal) で加振実験を行なっているので、砂層内では完全液状化が生じないものと考えられる。このために加振中に基礎模型の振動中立位置が一方向に傾いていくという傾向は見られなかった。

基礎模型に定振幅加振（入力加速度 100 gal）を作用させたときの振動土圧 P_3 と回転角との関係を、連続的な加振振動数のパラメータでもって図示したものが Fig. 7 である。ここで矢印は定振幅加振の掃引方向を示している。基礎模型の回転角が大きいところでは、加振振動数の高いほうが同一回転角に対する振動土圧が大きい。このことは、加振振動数の増加に伴い結果的に砂地盤の水平方向の剛性が増加していることが一原因であると考えられる。

これらの Fig. 5, 6, 7 に共通的に見られた加振振動数の増加に伴う砂地盤の剛性の増加は、結局は砂槽の側壁による影響が主原因であろうと考えられる。すなわち、本実験の振動数範囲においては、加振振動数が増加するにつれて地盤を伝わる波の速さ、したがって砂槽の壁によって模型にまで反射してくる波の速さが増すので、模型に作用する反力としての土のエネルギーも大きくなっているであろうと考えられる。またこの他に振動時における基礎体と地盤との位相差なども関係があるであろうと思われる。

Fig. 8 は、定振幅加振時における応答倍率（応答速度と入力加速度との比）を示す。図 (a) は湿潤状態 W_4 において入力レベルを変えたものであり、図 (b) は入力レベルが 100 gal であるときに含水比を変えたものを示している。Fig. 8 (a) より、入力レベルが大きいほどピークの立ち上がりが緩やかで、応答倍率が小さい傾向にあり、またピーク振動数が低くなる傾向にあるといえる。これは、入力レベルの増加がその応答量の増加、したがって基礎模型に接する砂のひずみの増加をもたらし、その結果模型境界での摩擦などによる減衰力が増加するためであると考えられる。このような傾向を把握することは、履歴復元力曲線などのモデル化を考える場合に重要な参考資料となる。図 (b) は砂地盤の含水比の増加にしたがい、応答倍率のピークレベルもピーク振動数とともに低下している傾向を表わしている。この傾向は、振動土圧 P_3 の Fig. 6 にも見られ、砂地盤の剛

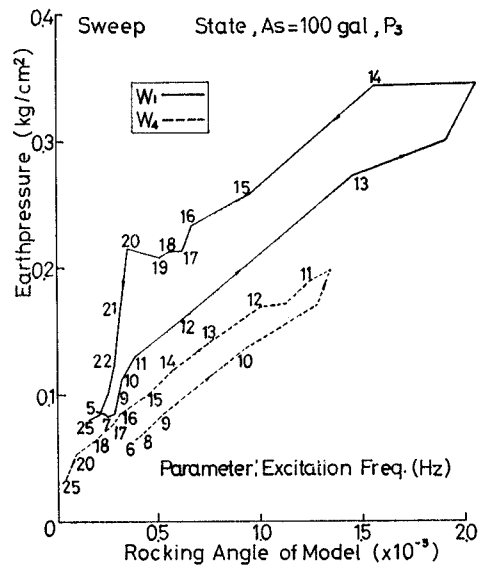


Fig. 7 Relation between Earthpressure and Rocking Angle of Model

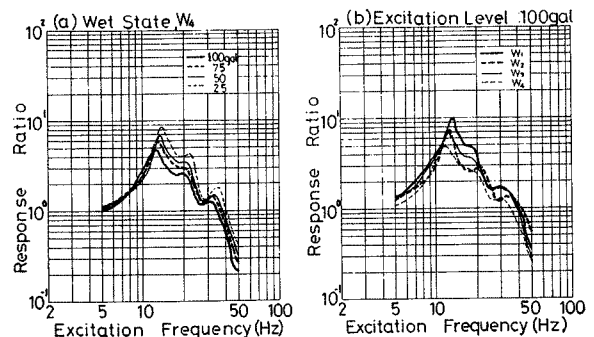


Fig. 8 Relation between Ratio of Response to Excitation and Excitation Frequency

性が低下したこと、間げき水が振動により減衰抵抗を増したためであろうと考えられる。

これらの模型境界での摩擦などによる減衰力や間げき水の振動による減衰抵抗などは線形とは考えられず、その量的評価がむずかしい。しかしこれらも基礎模型体の履歴復元力の中に含まれて計測されていることになるので、たとえば履歴面積に着目する周知の等価減衰定数として近似的に量的表示するのの一方法であろう（これについては別に発表⁹⁾）。

Fig. 9 (a) は基礎模型に働く全振動土圧（全反力）による模型底部のヒンジまわりのモーメント M_E と模型回転角との関係、図 (b) には基礎模型体の慣性力によるヒンジまわりの回転モーメント M_I と回転角との関係が示されている。

M_E の算定に当っては、たとえば **Fig. 3** において土圧 P_i は第 i 番目の土圧計（これのヒンジからの高さを h_i とする）近傍の土圧を代表していると考え、 P_i と P_i が代表していると考えられる模型の表面積 A_i および h_i とを掛け合わせ、これを全土圧計 P_i について加え合わせた。このとき水平断面の土圧分布（たとえば **Fig. 4**）を考慮したが、水平断面における土圧の分布形状はヒンジからの高さにかかわらず同一の形であるものとした。図は湿潤状態 W_1 におけるものであり、加振状態は振幅漸变的加振で、その入力加速度を 0 gal から 200 gal まで増加させたものである。回転角に対して M_E および M_I はともにばね軟化型の傾向を示しているが、その傾向は M_E のほうが M_I より顕著である。また回転角がおよそ 0.8×10^{-3} 以上においては加振振動数が高いほど大きい値を示していることが認められる。

これら2つのモーメント、 M_E と M_I との関係を示したものが **Fig. 10** である。図中 (a), (b) はそれぞれ砂地盤が乾燥状態 D と湿潤状態 W_2 に対する結果である。 M_I と M_E のレベルが小さいときは、 M_I と M_E とで動的つり合い状態にあり、このレベルがおよそ $2 \sim 3 \times 10^3 \text{ kg}\cdot\text{cm}$ 以上になると動的つり合い状態が崩れる傾向にある。この傾向は、基礎模型の応答量の増加により履歴損失による減衰力や模型の側面摩擦などの抵抗力が大きくなるためと考えられる。

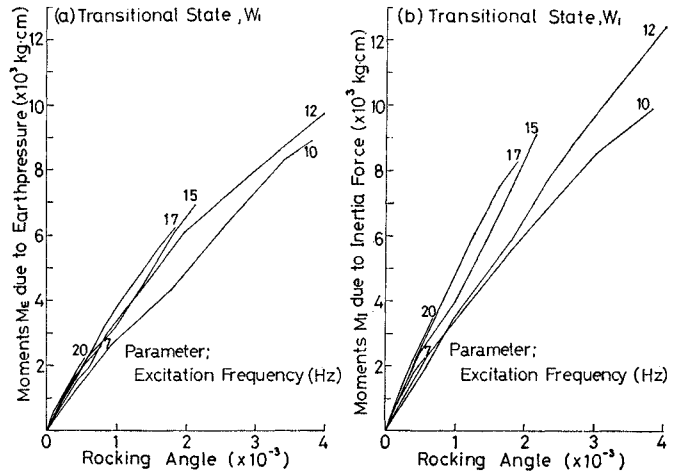


Fig. 9 Relation between Restoring Moments and Rocking Angle of Model

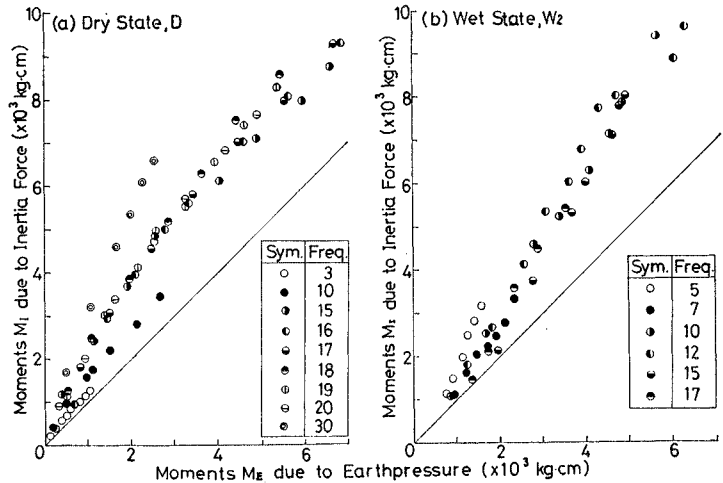


Fig. 10 Relation between Moments due to Inertia Force and due to Earthpressure

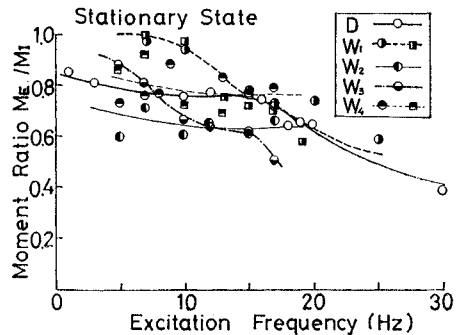


Fig. 11 Relation between Moment Ratio and Excitation Frequency

Fig. 11 は定常的正弦波加振におけるモーメント比 M_E/M_I と加振振動数との関係を示したものである。図中、丸印は入力加速度を 200 gal に設定したときの定

常的加振状態に対するものであり、湿潤状態 W_1 と W_4 の角印は基礎模型の応答変位が一定となるように入力加速度を設定したときの結果である。砂地盤が D , W_1 , W_3 の状態では、加振振動数が高くなるにしたがってモーメント比 M_E/M_I は小さくなり、0.4~0.5 程度まで下がる。また、湿潤状態 W_2 , W_4 においても加振振動数の増加とともにモーメント比は徐々に低下する傾向にある。この原因としては次のようなことが考えられる。

Fig. 10 のところで述べたように、加振振動数の増加に伴い砂地盤の剛性が増し、その結果模型側面におけるせん断抵抗が大きく作用することになる。ところで地盤の全反力モーメントは M_I とつり合うものと考えられる。以上のことより、土圧計から測定した反力モーメント M_E の、地盤の全反力モーメント M_I に占める割合が相対的に低下することになるのではないかと考えられる。

4. 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入力として作用するときの模型の応答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、振幅や振動数が不規則に変化するので、そのような波形が入力として構造物に作用するときの応答も時間的に不規則な挙動を呈する。ところで、前節で見たように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同じではなかった。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。いいかえると、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、正弦波加振の結果のみから推定され得ない現象が生ずることも予想されるので本実験を実施したものである。

Fig. 12 は湿潤状態 W_4 におけるランダム波加振時の一記録例であり、上から順に振動土圧 P_3 、応答回転角 φ_m 、応答加速度 A_m^* および入力加速度 A_s を示してある。この入力波のスペクトル密度は約 2~62 Hz の振動数領域で一定値となるように規制されており、本加振状態において可能な最も広い振動数範囲の成分をほぼ均等に含んでいるので、この場合の入力を近似的にホワイトノイズとみなし、ノイズAと呼ぶことにする。なお、この入力加速度は平均値 0 gal で、その標準偏差は 50 gal である。入力 A_s がかなり高い振動数成分を含んでいるにもかかわらず、応答の P_3 , φ_m , A_m は入力と比べると比較的周期化されており、いわゆる地盤—構造物のフィ

* A_m は模型頂部に取り付けた加速度計より得られる値のことで、応答加速度と入力加速度の和を表わすが、本文ではこの値を単に応答加速度と呼ぶことにする。

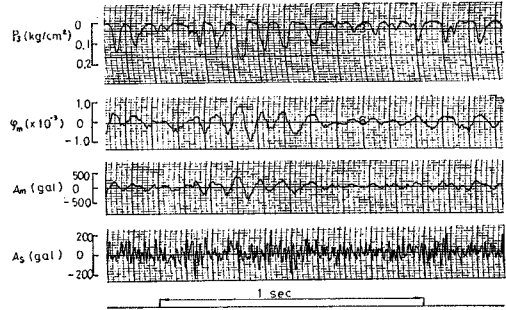


Fig. 12 An Example of Records, Noise A, W_4

ルター作用が認められる。なお以下においては、不規則な量の性質を把えて解析するのによく用いられる関数、すなわちパワースペクトル密度、自己相関関数、確率密度関数および確率分布関数に注目して不規則応答の考察を進めていく。

(1) パワースペクトル密度 $S(f)$

ランダムな波形の周波数特性を表現するのに適しているパワースペクトル密度を用いて入力 A_s と応答 A_m , φ_m を示したのが **Fig. 13** である。同図は乾燥状態におけるもので、標準偏差 50 gal のノイズAによって加振した結果である。振動台の性能の関係でノイズA (ホワイトノイズ) とはいうものの、入力のスペクトル $S_{A_s}(f)$ は平坦とは限らずいくつかのピークを有しているので、

応答における相当する振動数付近の成分も少し卓越している。応答のスペクトル $S_{A_m}(f)$, $S_{\varphi_m}(f)$ より約 25.5 Hz が模型の固有振動数 f_0 によるピークであることがわかる。このことから、このことからもよくいわれるように、模型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。応答加速度と応答回転角のスペクトルの傾向はほぼ同じであるが、前者のほうが f_0 より低い振動数範

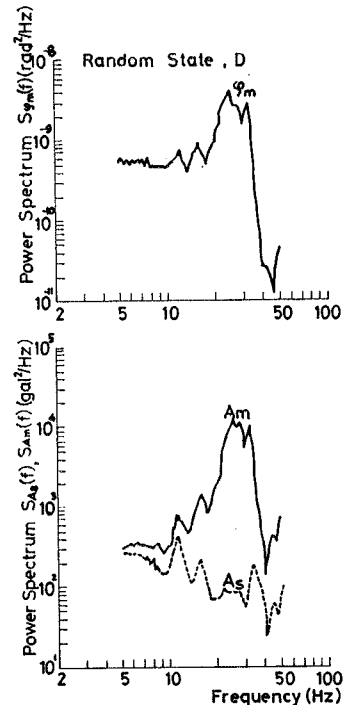


Fig. 13 Power Spectra, Noise A, D

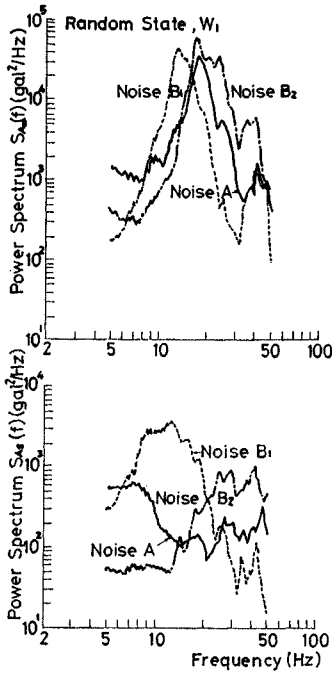
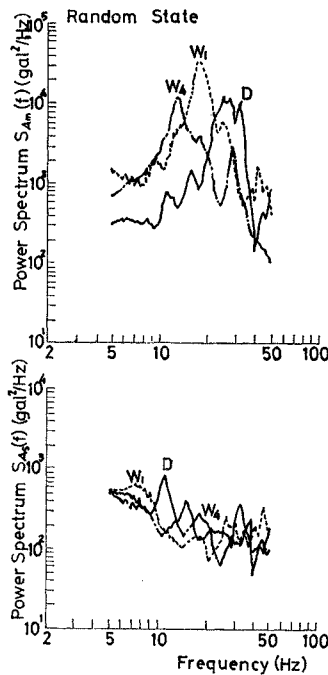


Fig. 14 Power Spectra, Noise A and B Fig. 15 Power Spectra, Noise A

間において比較的その立ち上がりが急になっている点が注目される。厳密な表現ではないが、応答加速度はほぼ応答回転角に加振円振動数の2乗を乗じたものである。 f_0 よりかなり低い振動数範囲の $S_{\varphi_m}(f)$ はほぼ一定値となっており、これに円振動数の2乗を乗ずるので、 $S_{Am}(f)$ における低振動数成分の立ち上がりが $S_{\varphi_m}(f)$ に比較して急になっているものと理解される。

Fig. 14は湿潤状態 W_1 におけるもので、入力加速度のスペクトルの分布形状の相違が応答に及ぼす影響を明示したものである。入力加速度はいずれも標準偏差が50 galとなるように規制してある。スペクトルの特性はホワイトノイズに近いもの：ノイズAと、比較的構造物の固有振動数 f_0 より低い振動数成分が卓越するもの：ノイズB₁、逆に f_0 より高い成分が卓越するもの：ノイズB₂の3種類である。共振振動数は入力スペクトル特性により異なり、約12~18 Hzの範囲に離散していることがわかる。なお正弦波加振による共振曲線より得られる f_0 は入力が100 galのとき約15 Hzである。このことは入力スペクトル図においてその値が卓越している振動数帯域に、共振振動数が引っ張られて移動していることを表わしている。いいかえると、加えられたランダム入力エネルギー密度の高い振動数帯域に、応答のエネルギーも集中することが確かめられたことになる。

次に砂地盤の湿潤状態の違いが応答に及ぼす影響について調べたものがFig. 15である。含水比はDと



W_1 , W_4 の3種類であり、入力加速度はすべて標準偏差50 galのノイズAである。地盤の含水比がD, W_1 , W_4 と増すにつれて f_0 が低下し、地盤の剛性が低下していることがわかる。なお他の湿潤状態における結果は本文には掲載していないが、それらを含めていえることは、湿潤状態においては応答倍率 $(=S_{Am}(f)/S_{As}(f))$ が含水比の増加に対して減少する傾向にあるということである。ただし、本実験においては乾燥状態における結果とは連続していない。これは乾燥砂がある程度水を含むと水が潤滑剤の役割をするので、砂層に根入れされた模型は振動しやすくなるのであろうと考えられる。ところがさらに含水量が増すと、砂層中の間げき水による減衰抵抗などが増加するので、応答倍率は逆に低下していくのであろうと思われる。以上に見たランダム波加振時のノイズAによる応答のスペクトルの傾向は、正弦波によ

る定振幅加振から得られる情報とかなりよい一致を示している。

(2) 自己相関関数

自己相関関数は不規則波の「不規則さ」、いいかえるとその周期性を表現するのに適した関数で、パワースペクトル密度とはフーリエ変換の対をなしている。Photo. 1は入力加速度 A_s 、応答加速度 A_m 、応答回転角 φ_m についての自己相関関数を示している。各写真の縦軸は入力大きさによって異なっているが、ここではその大きさは問題とせず形そのものについて検討を加える。同写真は乾燥状態において標準偏差が50 galのノイズAと、16~31.5 Hzの振動数帯域に成分を有するノイズBとを作用させたときのものである。ノイズAの自己相関関数はずらし時間の増加とともに急速に減衰し、入力としてのノイズAがかなり不規則であることを示しているが、応答のそれは A_m , φ_m ともかなり周期化されている。この周期は0.037 secであり、Fig. 13のスペクトルから読み取れる固有振動数25.5 Hzとよく対応している。次に、16~31.5 Hzの振動数成分を持つノイズBの自己相関関数はかなり周期化されているが、応答のそれはノイズBの周期やノイズAにおける応答の周期とも若干異なる周期で振動しており、このことからスペクトルにおいて考察したように応答は入力を持つ振動数特性に影響されることがわかる。

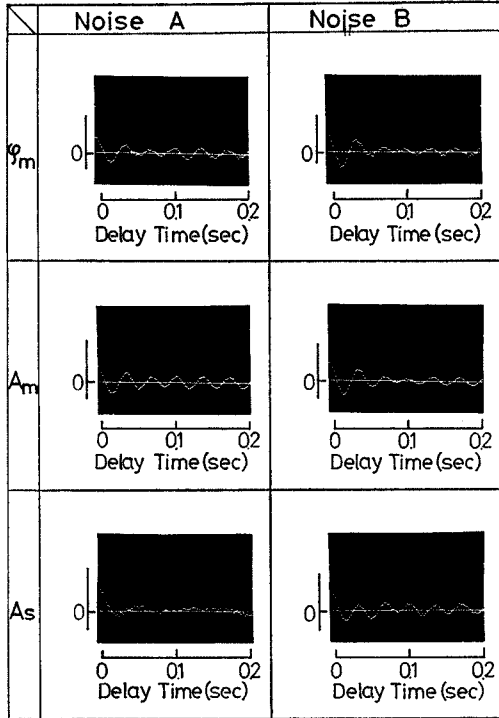


Photo. 1 Auto-correlation Functions, Noise A and B, D

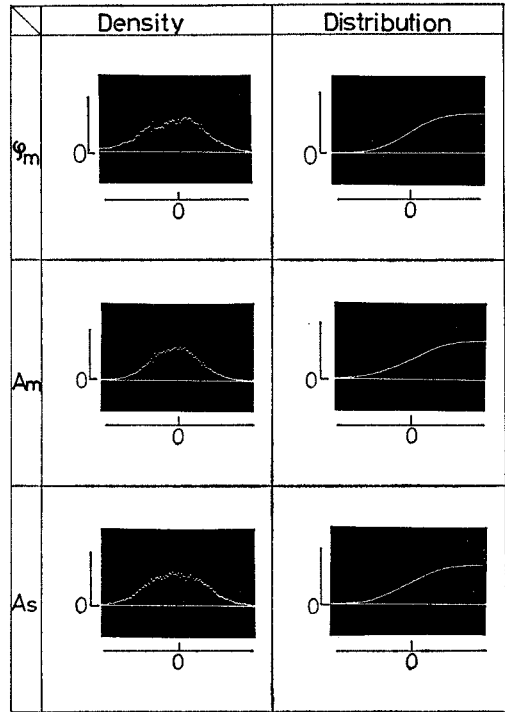


Photo. 2 Probability Density and Distribution Functions, Noise A, D

(3) 確率密度関数および確率分布関数

砂地盤が乾燥状態にあるときの入力加速度 A_s 、応答加速度 A_m 、および応答回転角 ϕ_m についての確率密度と確率分布の関数を示したものが Photo. 2 である。入力加速度は標準偏差 50 gal のノイズ A である。入力の確率密度はほぼ正規分布を示しているが、応答回転角の形状は片側に寄っており、応答加速度は正規分布に比べて頂部がつぶれた形状を呈している。このように正規分布からずれる傾向は応答加速度よりも応答回転角に強く現われている。これは本文で用いている応答加速度には入力の加速度も含まれているので、応答そのものの確率密度の特性が少し弱められているのであろうと思われる。なお応答の確率密度関数が若干ひずんでいるのは、ホワイトノイズを線形振動系に作用させると、入力が正規分布でなくても応答は正規分布になりやすいという性質に対して、系の復元力が非線形であるがゆえに生じたであろう一つの結果であると解される。ただし、この場合の非線形性とは、応答の確率密度関数が正または負側にずれていることを考えると、たとえば模型自身、模型前後の砂、土槽、振動台などの振動方向における非対称性などがわずかながらとはいえ、結果的には影響して現われたものではなからうかと考えられる。他の砂地盤状

態や他の入力加速度においても、入力や応答の確率密度は上に示した結果とほぼ同様の傾向が見られた。なお、当然のことながら、写真を見るとわかるように、確率分布関数よりも確率密度関数のほうがランダム波の振幅特性をつかみやすい。

(4) 復元力特性

ランダム波加振時における復元力特性を考えるために、横軸に模型回転角、縦軸に水平復元力モーメントを図示したのが Photo. 3 である。復元力曲線の推定法はいくつか提案されている⁹⁾が、本研究においては水平復元力モーメントに比例する量と考えられる応答加速度を縦軸として採用した。この方法にはその比例定数の決定法や、加速度計の持つ位相特性を補正していないという点に問題があるが、ランダム波が作用したときの復元力の動きの概略を簡単に把握することができるという特長がある。写真は湿潤状態 W_4 における記録で、上欄は入力加速度の標準偏差を 50 gal に、下欄は 100 gal に設定したときの結果であり、図中の振動数範囲は入力加速度のスペクトルが比較的大きいエネルギーを持つ範囲である。また X と Y はそれぞれ各図の横軸と縦軸の 1 目盛当りの値を示している。この状態における模型の固有振動数 f_0 は約 12.5 Hz であるが、この値よりも低い

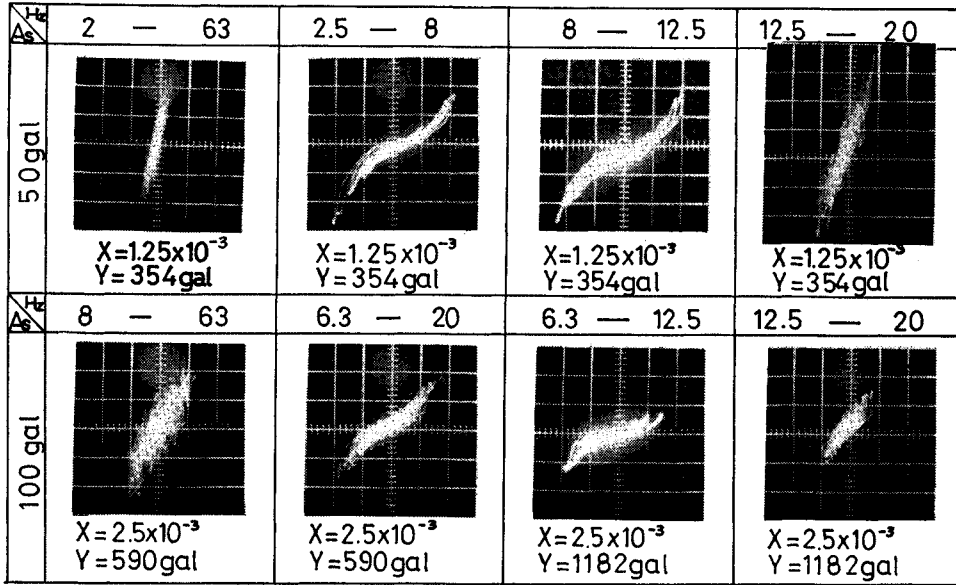


Photo. 3 Hysteresis Curves of Horizontal Restoring Force, X and Y ; distances between meshes scaling the ordinate and abscissa, respectively, Noise A and B , W_i .

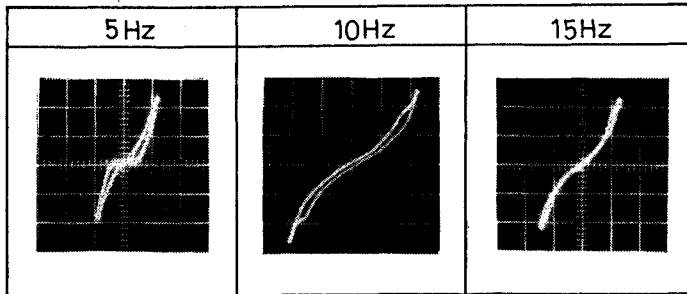


Photo. 4 Hysteresis Curves of Horizontal Restoring Force, Stationary Sinusoidal Wave, W_i .

振動数成分のみで構成されるノイズに対する復元力モーメントの履歴曲線は中立軸付近で復元力モーメントが小さく、また個々の履歴形状はスリップ型で摩擦の効いたばね硬化型となっている。一方、入力振動数成分の帯域が広いか、あるいは f_0 より高い成分で構成されていると、中立軸付近におけるふくらみの増した摩擦の効いたばね硬化型となり、かなり複雑に入りくんだ形になっている。このように復元力特性は入力振動数特性によって大きく影響を受けているが、この傾向そのものは同一湿潤状態における正弦波加振による復元力特性とかなりよく一致している。すなわち、入力振動数が f_0 より低い正弦波で加振すると、模型中立位置での復元力モーメントを持たないような特性を示す (Photo. 4) が、正弦波の振動数が f_0 より高くなると地盤の見掛の剛度が増加するため中立位置での復元力を回復する (Photo. 4)。これらはランダム波において考察したこととよい対

応を示しているが、特に f_0 より低い振動数成分のみで構成されているノイズによるものは、振幅漸变的正弦波加振による復元力モーメントの挙動とほとんど変わらない。ノイズが高振動数成分を含むにつれてランダム波による復元力特性と正弦波加振によるそれとの明らかな関係はつかみにくい。

5. 結 論

地震時における構造物基礎の動的挙動

を究明するために、砂地盤を対象として、乾燥状態 D 、湿潤状態 $W_1 \sim W_4$ の 5 種類に変え、入力を正弦波 (定常的、振幅漸变的、定振幅) 加振およびランダム波 (比較的広帯域ノイズ、比較的狭帯域ホワイトノイズ) 加振の 5 種類に変化させて模型実験を実施した。以下に得られた成果を要約して列挙する。

(1) 構造物基礎に作用する振動土圧の深さ方向の分布および水平断面における分布は、砂地盤の含水状態、加振波形の振幅の時間的変化や加振振動数によってその形状が変化し、特に水平断面における振動土圧分布においてその変化が大きい。

(2) 構造物基礎に作用する全振動土圧 (全反力) による構造物基礎回転中心まわりのモーメント M_E と、構造物基礎体の慣性力による構造物基礎回転中心まわりのモーメント M_I との関係は、その応答レベルが小さいときには動的つり合い状態にあるが、応答レベルの増

加によって模型側面の摩擦抵抗力などが大きくなり、しだいに M_E/M_I の値は小さくなる。

(3) 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共振振動数も低下する。また砂地盤の含水比が比較的小さい場合には、水が潤滑剤の役割をなし、乾燥状態の場合よりも応答倍率は大きくなるが、さらに含水比が増すと、砂層中の間げき水による減衰抵抗などが増加するので、応答倍率は逆に低下する。

(4) ランダム波が作用すると、よくいわれるように地盤—構造物基礎系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。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したとき、構造物基礎の共振振動数は入力に加振振動数帯域に近いほうにずれる。

(5) たとえランダム入力の振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は正規分布とは異なる分布形状を示す。

(6) ランダム波が作用したときの構造物基礎の復元力モーメントは、そのランダム波の振動数特性によって大きな影響を受ける。構造物基礎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ノイズが作用したときの復元力モーメントは、同様の範囲の振動数をもつ正弦波加振時のそれとよい対応を示している。しかし、ノイズが高振動数成分を含むにつれてランダム波と正弦波による復元力モーメントの明らかな関係を把握することは困難である。

以上のような研究成果が得られたが、本実験における問題点あるいは今後の課題を列挙すると次のとおりである。

(1) 境界条件が構造物基礎の応答に与える影響についての十分な検討をすること。

(2) 構造物基礎模型の底部でのヒンジを取り除き、

実構造物基礎に近い状態で実験を行なうこと。

(3) 模型の断面形状を変え、その応答の違いを検討すること。

(4) 本実験における土圧とは、土圧計で測定した値のことであり、湿潤状態においては水圧をも含めた値となっている。今後はさらに構造物に作用する土圧と水圧を分離して検討すること。

以上に述べた点を中心に、構造物基礎の耐震設計の確立をめざしてさらに各種の実験を積み重ねていく予定である。

最後に本実験実施にあたり種々ご協力をいただいた当研究室の吉原 進助手に深謝の意を表わすとともに、本実験に多大の便宜を与えられた本学防災研究所ならびに土木工学教室橋梁工学研究室の関係各位に対して謝意を表わす次第である。また本研究は一部昭和 47 年度文部省科研費（総合研究 A）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) たとえば、後藤尚男・秋吉 卓：弾性地盤中にある基礎構造物の地震応答特性—楕円断面を有する剛体基礎—, 土木学会論文報告集, 第 177 号, pp. 21~32, 1970.5.
- 2) たとえば、伯野元彦・野尻陽一：ケーソンの動特性に関する一研究, 土木学会論文報告集, 第 170 号, pp. 9~22, 1969.10.
- 3) 代表者 後藤尚男：基礎体—地盤系の振動, 地震応答, 耐震設計に関する研究, 本州四国連絡橋公団委託研究報告書, 昭.47.3
- 4) 吉見吉昭：砂質土の液状化, 土質工学会誌「土と基礎」, 第 20 巻第 8 号, pp. 75~82, 1972.8.
- 5) 後藤尚男・吉原 進・北浦 勝・宮脇幸治郎・横山正義：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, 京都大学防災研究所年報 16B (投稿中).
- 6) 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, pp. 1~11, 1971.11.

(1973.4.17・受付)