

(82) 模型地盤中の基礎の振動実験

国鉄・構造物設計事務所
同上

正会員
正会員

○西村 昭彦
高橋 良輝

1. まえがき

今までの土木構造物の被害は軟弱地盤に多い。この原因の1つとして、脆弱な表層で地震波が増幅され、地盤変位が大きくなるということが考えられる。そのため、この地盤の変位の影響を考慮する応答変位法が軟弱地盤中の基礎の耐震設計に取り入れられるようになって来た。

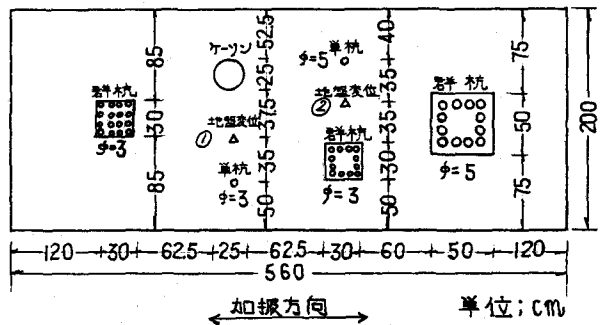
そこで、この設計法の検討を行うため、振動台の上に模型地盤を作成し、その地盤中に杭およびケーソンの基礎模型を設置し、静的載荷試験、振動台による振動実験、基礎上に固定した起振機による振動実験を実施した。以下に実験および解析の概要を述べる。なお、今回は断面の都合上、主として群杭について述べることにする。

表-1. 模型の諸元

物理量	実物	縮尺率	理想模型	実模型	備考
層厚	1.5m	25	6.0cm	6.0cm	沖積層
S波速度 V_{s1}	60~80m/s	5	12~16m/s	12m/s	"
S波速度 V_{s2}	$V_{s2} \geq 250m/s$	5	50m/s	54m/s	支持層
単位体積重量 γ_{01}	1.2 t/m ³	1	1.2 t/m ³	1.12 t/m ³	表層
単位体積重量 γ_{02}	1.7 t/m ³	1	1.7 t/m ³	1.61 t/m ³	支持層
周波数	1 Hz	1/5	5 Hz	6.1 Hz	
P I	直径				ポリカーボネイト
	800mm	25	3.2cm	3.0cm	
	1200mm	25	4.8cm	5.0cm	
	ヤング率	$2.7 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$	$108 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	$2.69 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	
	曲げ剛性	$5 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$	$512 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	$944 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	
	$2.75 \times 10^9 \text{ kg/cm}^2$	25^3	$282 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	$326 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$	
ケーソン	長さ	1.5m	6.0cm	6.0cm	塩化ビニール
	密度	2.4 t/m ³	1	2.4 t/m ³	
	直径	6000mm	25	2.4cm	
	長さ	1.5m	25	6.0cm	

2. 実験の概要

実験を行うために、まず、模型の大きさおよび模型地盤の材料について検討を行った。その結果、模型の大きさについては表-1に示す値とした。また、模型地盤の材料は、表層および支持層について、アクリルアミド系注入剤、水、ベントナイト、ゲソウ土、砂(支持層のみ)を主成分として配合を行った。模型の製作は、まず、地盤材料をミキサーで攪拌し、液状にして土槽へコンクリートポンプで打設し、その中に杭、およびコンクリートの杭基礎を設置した。また、模型地盤の大きさは、 $56\text{m} \times 20\text{m} \times 0.8\text{m}$ とした。模型地盤の一般図を図-1に示す。この地盤および基礎に対して、静的載荷試験、振動台加震実験、起振機加震実験を行い、地盤の固有振動数、振動モード、基礎に生ずる変形、応力を測定し、理論値との比較を行った。



3. 実験結果

3.1 地盤の変形係数

模型地盤の変形係数(E)およびせん断弾性波速度(V_s)について静的並びに動的な各種試験を行った。それから得られる変形係数の値は、表2

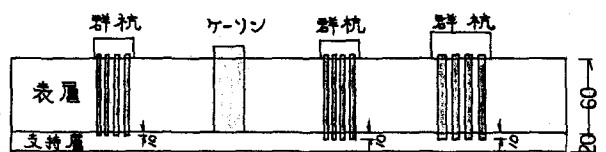


図-1. 一般図

の通りである。この結果、表層地盤については、弾性波速度試験から求まる値と平板載荷試験から求まる値はかなり近い値を示すが、支持層については、大きく離れている。これは、支持層は砂質土を多く含んでいるため、地盤の強度に歪依存性があることによると考えられる。

表-2 地盤の変形係数

	単位体積 重量(g/cm^3)	せん断波 速度(m/sec)	せん断波か 求めた E_s (kg/cm^2)	平板載荷か 求めた E_s (kg/cm^2)
表層	1.2	12.0	5.2	3.8
支持層	1.7	50.0	114	12.2

3.2. 地盤の振動台加振試験結果

地盤の共振曲線を図-2、それから読み取れる卓越周波数を表-3に示す。なお、4.1Hzのときの振動モードは、正弦波の波長の型を示し理論値とよく一致した。

3.3 群杭、橋脚く体振動台加振試験結果

群杭、橋脚く体の共振曲線を図-3、図-4に示す。この場合の卓越周波数を表-4に示す。なお、フーチングの上に載荷しにく体の大きさ、重量は、鉄板($32\text{cm} \times 32\text{cm} \times 2.0\text{cm}$, 16.0kg /枚)、アルミ板($32\text{cm} \times 32\text{cm} \times 2.0\text{cm}$ 大: 14.5kg /枚, 小: 5.5kg /枚)、起振機(15.0kg)である。

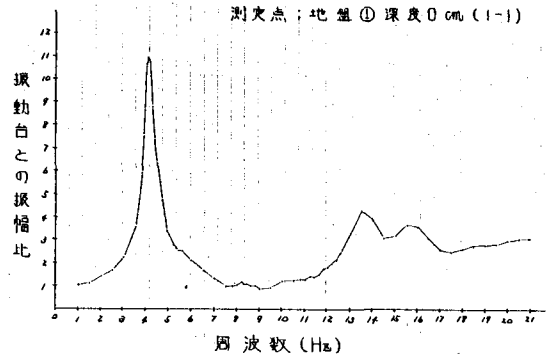


図-2 地盤の共振曲線

表-3 卓越周波数一覧表(地盤)

試験名	卓越周波数	増幅度	減衰定数(%)
地盤①	4.1	11.0	6.1
	13.5	4.3	

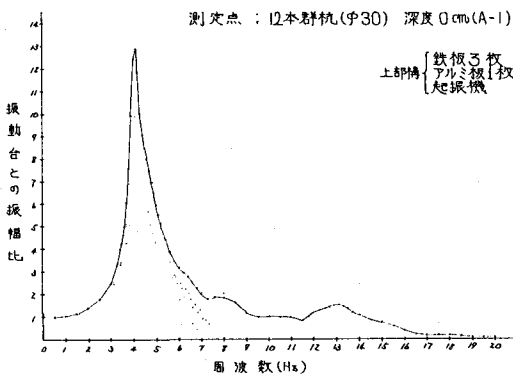


図-3 群杭(φ30)共振曲線(振動台)

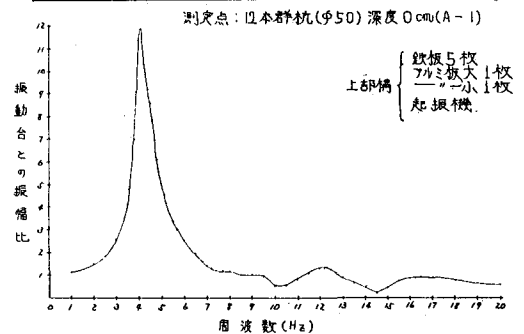


図-4 群杭(φ50)共振曲線(振動台)

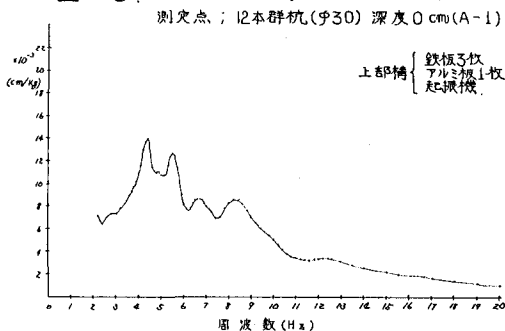


図-5 群杭(φ30)共振曲線(起振機)

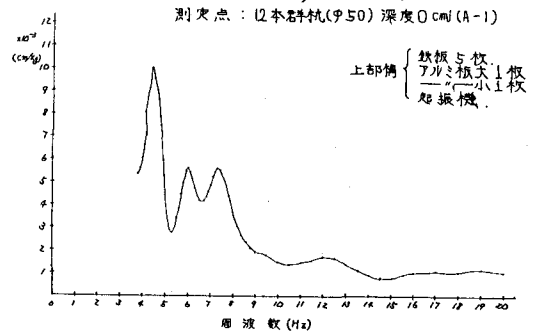


図-6 群杭(φ50)共振曲線(起振機)

4. 実験の解析

4.1 地盤の固有振動数解析

地盤の固有振動数は、表層が主として振動すると考えたと次のようになる。

$$f = \frac{V_s}{4l}$$

ここに f : 地盤の固有振動数 (Hz)

V_s : 表層地盤のせん断弾性波速度 (m/sec)

l : 表層地盤の厚さ (m)

これに、表-2のせん断弾性波の値を入れると、 $f = 5.0$ Hzとなる。これに対し実験値は4.1 Hzであった。この原因は、地盤の歪依存性による強度低下にあると考えに。この歪依存性は下層地盤の方がより強いので、下層を含めて2層地盤として解析することとした。2層地盤の式は次のようになる。

$$(1+\alpha)\cos w_0\left(\frac{l_1}{v_1} + \frac{l_2}{v_2}\right) + (1-\alpha)\cos w_0\left(\frac{l_1}{v_1} - \frac{l_2}{v_2}\right) = 0$$

$$\alpha = \frac{v_1 v_2}{v_2^2 - v_1^2}$$

ここに v_1, v_2 : 表層、下層のせん断弾性波速度

l_1, l_2 : 表層、下層の厚さ

ρ_1, ρ_2 : 表層、下層の単位体積重量

w_0 : 固有円振動数

この式を用いて、実験を説明出来るせん断弾性波の値について検討した。その結果を表-6に示す。これを見ると、ケース3が実験値と合っている。そこでこの値を用いることの妥当性を確かめるために、ケース3について、地盤の歪の大きさを求めてみる。その結果、下層は 1.3×10^{-3} に達しており、この値を、資料の歪依存性のグラフにあてはめると、 $v_2 = 26$ m/sec程度となることから、ケース3の値は、地盤が振動するときの値として妥当なものと考えられる。

4.2 水平載荷試験解析

群杭の水平載荷試験における水平地盤係数(土値)の推定は、水平載荷試験結果の「荷重～変位曲線」から、Changの式を用いて、逆算土値を求め、この値を使って応力の検算を行った。その結果、応力は実験値とよく一致した。その応力モードを図-7に示す。

4.3 群杭、橋脚く体振動台加振実験解析

解析は、次の式を用い、対象として地盤の共振高は、歪のもっとも大きい4.1 Hzについて行った。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = \rho D \{ f(x) - y \}$$

ここに EI : 杭の曲げ剛性 (kg・cm²)

D : 杭径 (cm)

ρ : 水平地盤係数 (kg/cm³)

y : 杭の変形 (cm)

表-4 卓越周波数一覧表(振動台)

試験名	卓越周波数 Hz	増幅度	備考
群グイ・ 橋脚く体	1次 4.1	1.2.9	(鉄板3枚)
	(7.6)	1.9	
	2次 13.1	1.5	
	1次 4.1	1.1.9	(鉄板5枚) 〔〕内は土圧
12本群グイ (φ50)	(4.1)		
	(〔5.7, 9.5〕)		
	2次 12.2	1.3	
	(〔13.5〕)		

表-5 卓越周波数一覧表(起振機)

試験名	卓越周波数 Hz	単位加振力当りの変位 (mm/g) × 10 ³	備考
群グイ・ 橋脚く体	1次 4.4	20.2	鉄板3枚
	共振域 5.5	8.3	
	6.6, 9.2		鉄板5枚 〔〕内は土圧
	1次 4.4	10.0	
12本群グイ (φ50)	(〔4.4〕)		
	共振域 6.0, 7.3	5.6	
	12.2, (7.0)		

表-6 地盤の固有振動数

ケース	試験名	v_1 (m/sec)	v_2 (m/sec)	f (Hz)	実験結果 (Hz)
1	せん断弾性波速度	12.0	50.0	4.9	4.1
2	平板載荷	10.2	16.4	3.9	
3		10.2	25.0	4.1	

又：地表面からの深さ (cm)

f(x): 水平地盤変位の鉛直方向分布

群杭の応力は、4.3の水平載荷試験の解析に用いた値をもとに計算を行った。そこで、動的水平地盤係数 (k_{hd}) と静的水平地盤係数 (k_{hs}) を比較すると k_{hd} が k_{hs} より多少弱い傾向にあった。計算の結果得られた応力モードを図-8、図-9に示す。

4.5 群杭、橋脚・橋脚基礎振動試験解析

振動台試験による共振曲線と、起振機試験による共振曲線の相違の検討については、現在、多自由度系モデルによる振動解析を実施中であり、ケーソンについては、ほぼよい結果が得られている。なお、詳細については、次の機会に紹介することにする。

5. まとめ

以上の実験の解析はまだ完了していないが、今までのところ次のような成果が得られた。

- (i) 地盤の固有振動数、振幅および振動モードは、理論値とよく一致する。
- (ii) 起振機による振動実験では、地盤の固有振動数および構造物の固有振動数は得られるが、振動台試験では、地盤の固有振動数は卓越するが、構造物の固有振動数は明確でない。このことは、地盤の固有振動数の方が構造物の固有振動数より低い軟弱地盤においては、地震時の構造物の挙動は、主として地盤の挙動に左右されるということを示している。したがって、軟弱地盤では、耐震設計に応答変位法を用いるのがよいと考えられる。
- (iii) 地盤が震動する場合の水平方向の地盤係数 (k_{hd}) は、水平載荷試験の水平方向の地盤係数 (k_{hs}) より、多少弱い傾向にある。
- (iv) 振動台と起振機の振動試験の性状の違いについては、多自由度系モデルによる解析でかなり説明できる。

以上の実験の実施に当っては、仙台新幹線工務局・技術管理課および株式会社・応用地質調査事務所・浦和研究所のみなさまに大変お世話になりました。併せて感謝の意を表します。

〔参考文献〕

耐震設計指針 (案) 解説：昭和54年7月 日本国有鉄道

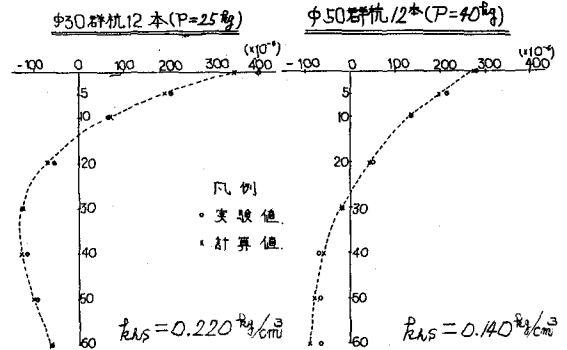


図-7. 群杭水平載荷試験応力モード

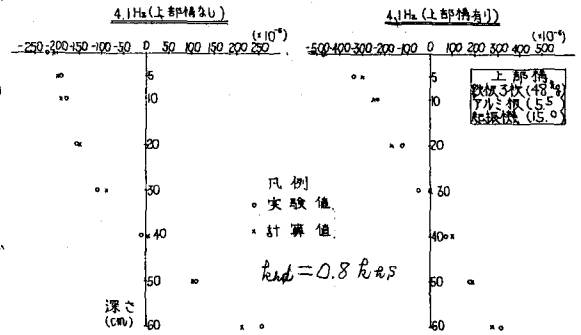


図-8. 群杭 (12φ30) 振動台試験応力モード

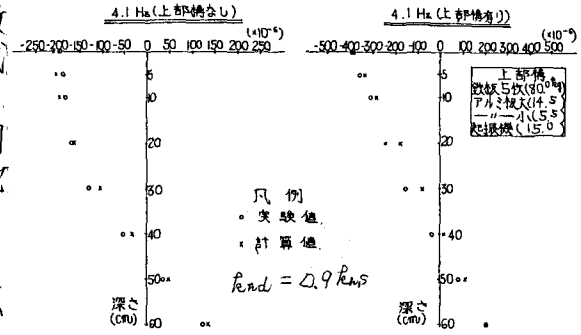


図-9. 群杭 (12φ50) 振動台試験応力モード