

# くい基礎振動実験

角 田 智 彦      此 上 典 文  
佐 藤      寛      茶 谷 文 雄

## Vibration Test of Pile Foundation

Tomohiko Tsunoda      Norifumi Konoue  
Hiroshi Sato      Fumio Chatani

### Abstract

One of the most important tasks for a designer concerned with a vibrating machine foundation is the estimation of dynamic spring constants and damping coefficients of the ground on which the plant foundation is to be constructed. Although estimation can be made to some degree based on data from past research, correct values are determined for a plant of importance from results of vibration tests.

The authors have carried out a number of tests with various combinations of the conditions of a foundation-pile-soil system, pile top and vibrating force magnitude and report on the details of these tests.

### 概 要

振動機械基礎の設計過程においては、基礎が設置される地盤のバネ定数および減衰定数の評価が重要な問題となる。既往の研究などによりある程度の推定は可能であるが、重要プラント基礎等に関しては、やはり現位置における実験結果に基づいて判断しているようである。

本報は、一連のプラント基礎設計に関連して、この種の振動実験を実施する機会を得たので、実験結果の内容等について述べたものである。なお、実験は、基礎—杭—地盤系の状態の相異、杭頭条件、加振力の大小などの要素を組み合わせた数種類の場合について実施した。

### 1. まえがき

一般に、機械および基礎は、支持地盤の弾性に比べると剛体と考えることができる。このような剛体の振動解析においては、地盤のバネ(水平バネと回転バネ)定数あるいは減衰定数などの評価が重要なポイントとなり、特に軟弱地盤上に計画されるような基礎に対しては、細心の注意が払われるべきである。

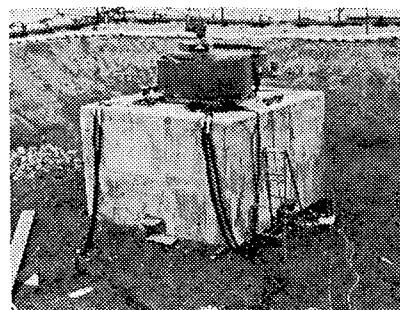
本報告は、上述の主旨のもとに、軟弱地盤上に作成された模型杭基礎の振動実験をおこない、基礎の動的挙動と諸定数、および杭の動的性状に関する実験結果について述べたものである。

### 2. 地盤と模型杭基礎

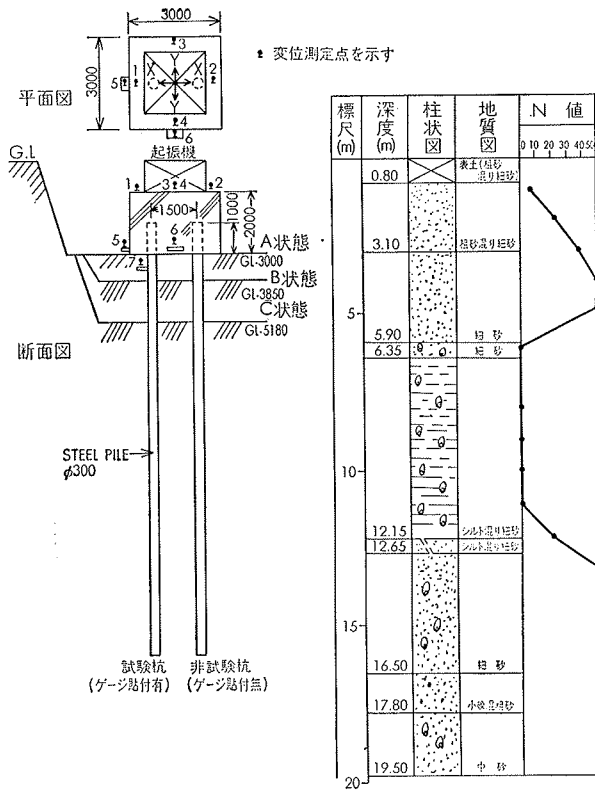
実験実施場所は、茨城県鹿島地区で、地表面下 6m

～12mの間にシルト層(N≒O)が存在する砂層地盤上である。基礎は RC 造直方体で、2本の鋼管杭により支持されており、本基礎の重心が剛心上にあるため1平面内におけるスウェーローッキング連成の2自由度として扱うことができる。写真—1に実験状況を、図—1に地盤柱状

図と杭基礎の形状を示す。なお、実験に先立って当地盤の動特性を把握する目的で、板たき法によるS波伝播速度( $V_s$ )および常時微動測定

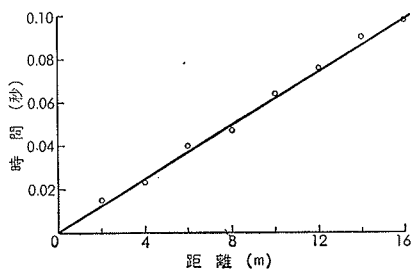


写真—1 実験状況

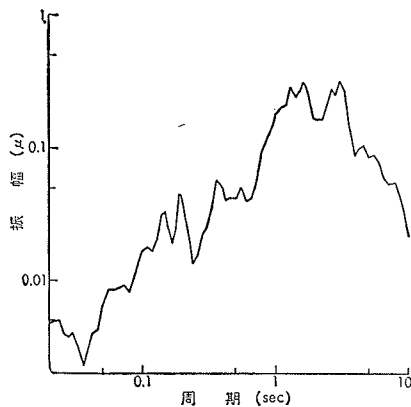


図一 地盤柱状図と模型杭基礎

をおこなった。図一2に走時曲線を、図一3に常時微動波形のフーリエスペクトルを示す。図一2より、 $V_s=163\text{m/s}$ となり、GL-6mより上部の砂層について $1/4$ 波長則より固有周期( $T_s$ )を算出すれば $T_s=0.15$ 秒となる。本実験では下層のシルト層の $V_s$ は確認できなかったため、N値より推定した $V_s=80\text{m/s}$ と上部砂層の $V_s$ との平均速度 $122\text{m/s}$ から $T_s$ を推定すると $T_s=0.43$ 秒となる。図一3



図二 走時曲線



図三 常時微動のフーリエスペクトル (E-W方向)

のスペクトルにおいて0.4秒付近のピークがこれに相当し、GL-13m以浅の地盤の固有周期と考えられる。

### 3. 杭基礎の振動実験

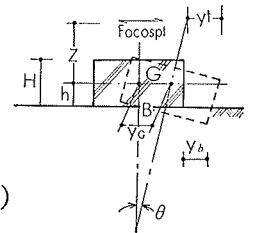
実験は下記の3状態におけるX、Y各方向の、起振機偏心モーメント $2\text{kg}\cdot\text{m}$ および $4\text{kg}\cdot\text{m}$ 時における水平加振実験とする。起振機は、建研型大型起振機を使用し、基礎重心直上に外力作用点がかかるように設置されており、スウェイとロッキング振動のみが生じ、水平面におけるねじれ振動は誘発されないものである。

- A状態：基礎底面と地盤とが接している状態
  - B状態：基礎底面と地盤の間に空隙がある状態
  - C状態：基礎底面土をシルト層まで掘った状態
- 実験 CASE 名として、例えば AX-2 は、A状態のX方向 $2\text{kg}\cdot\text{m}$ 加振実験を意味する。

### 4. 剛体の運動方程式と動的K値

図一4のようなスウェイロッキング2自由度系の運動方程式は(4.1)式のとおりである。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{y}_G + C_h(\dot{y}_G - \dot{\theta}\cdot h) \\ + K_h(y_G - \theta\cdot h) \\ = F_0 \cos pt \\ I_G\ddot{\theta} + C_\theta\dot{\theta} + K_\theta\theta \\ - K_h\cdot h(y_G - \theta\cdot h) \\ = Z\cdot F_0 \cos pt \end{aligned} \right\} (4.1)$$



図四 振動モデル

今、系が共振状態すなわち外力と応答との間に90度の位相遅れがある場合に限定すれば(4.2)式が成立することになり、非減衰自由振動の場合と同式となる。

$$\left. \begin{aligned} M\ddot{y}_G + K_h(y_G - \theta\cdot h) = 0 \\ I_G\ddot{\theta} + K_\theta\theta - K_h\cdot h(y_G - \theta\cdot h) = 0 \end{aligned} \right\} (4.2)$$

上式より  $K_\theta$ ,  $K_h$  は(4.3)式の如くなる。

$$\text{回転バネ定数 } K_\theta = I_B \cdot v^2 \left\{ 1 + \frac{h\cdot H}{i_B^2} \frac{1}{\frac{y_t}{y_B} - 1} \right\} \quad (4.3)$$

$$\text{水平バネ定数 } K_h = Mv^2 \left\{ 1 + \frac{h}{H} \left( \frac{y_t}{y_B} - 1 \right) \right\}$$

$$\text{鉛直方向動的地盤係数 } k_v = \frac{K_\theta}{AI_B} \quad (4.4)$$

$$\text{水平方向動的地盤係数 } k_h = \frac{K_h}{A}$$

ここで

$I_G$  : 重心まわりの質量慣性能率 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}^2$ )

$I_B$  : 底面の図心まわりの慣性能率 ( $\text{kg}\cdot\text{cm}\cdot\text{sec}^2$ )

$AI_B$  : 底面の図心まわりの断面2次モーメント ( $\text{cm}^4$ )

$i_B^2$  :  $I_B/M$

従って、共振時のモードを測定すればみかけの動的地盤係数は算出できる。本基礎に対する諸元を表-1に示す。

M	$45.2 \frac{\text{kg} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}}$	$I_G$	$5.05 \times 10^5 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}}$
h	103.5 cm	$I_B$	$9.89 \times 10^5 \frac{\text{kg} \cdot \text{cm} \cdot \text{sec}^2}{\text{cm}}$
H	200.0 cm	$A I_B$	$6.75 \times 10^8 \text{cm}^4$
A	$9 \times 10^4 \text{cm}^2$	$i_B^2$	$2.19 \times 10^4 \text{cm}^2$

表-1 各定数一覧表

### 5. 実験結果とその検討

#### 5.1. 基礎の振動測定について

図-5に各CASEの共振曲線を示す。本図は、当所が開発したデータ処理システムにより作成したもので、本システムはデータレコーダに収録された測定波形のA-D変換、コンピューターによるノイズ処理の相関計算、結果の図表化がすべて自動的に処理できるものである。図-5より、AXのCASE以外においては2次の共振々動数が確認された。CASE-AX-2で

は20Hzを超えた振動数領域に2次共振点があるため、起振機の性能上確認されなかった。表-2は、各CASE時における実験結果の諸定数を示したもので、図-6は、動的K値と減衰定数の基礎底面の変位量との関係である。表-2の $k_h/k_v$ の値は、A、B両状態と

CASE	重量中心モーメント (kg-m)	共振振動数 (Hz)	基礎上部変位量 (μ)	基礎底面変位量 (μ)	基礎中心変位量 (μ)	動的地盤係数 (kg/cm <sup>2</sup> ) 水平方向 (k <sub>h</sub> )	動的地盤係数 (kg/cm <sup>2</sup> ) 鉛直方向 (k <sub>v</sub> )	k <sub>h</sub> /k <sub>v</sub>	減衰定数 (%)
AX	2	8.2	+232	+122	+177	1.96	7.98	0.25	10.1
	4	5.8	+928	+525	+727	0.93	4.35	0.21	5.0
AY	2	3.4 16.0	+347 +80	+126 -80	+233 -10	0.44	1.03	0.43	10.7 12.5
	4	3.0	+549	+213	+381	0.32	0.83	0.39	11.7
BX	2	4.1 15.6	+843 +251	+660 -264	+752 -28	0.38	4.30	0.09	2.4 3.9
	4	3.8	+1144	+876	+1010	0.34	3.06	0.11	4.0
BY	2	1.7 10.3	+1430 (+)	+371 -237	+901 (-)	0.14	0.22	0.64	5.9 4.9
	4	1.6 9.8	+2244 (+)	+1005 -543	+1625 (-)	0.07	0.33	0.21	5.3 5.1
CX	2	2.1 12.8	+421 +210	+266 -133	+344 +24	0.11	0.67	0.16	3.1 4.3
	CY	自由振動	1.0	---	---	---	---	---	0.3

(上段：1次共振時 下段：2次共振時)

表-2 実験結果の一覧表

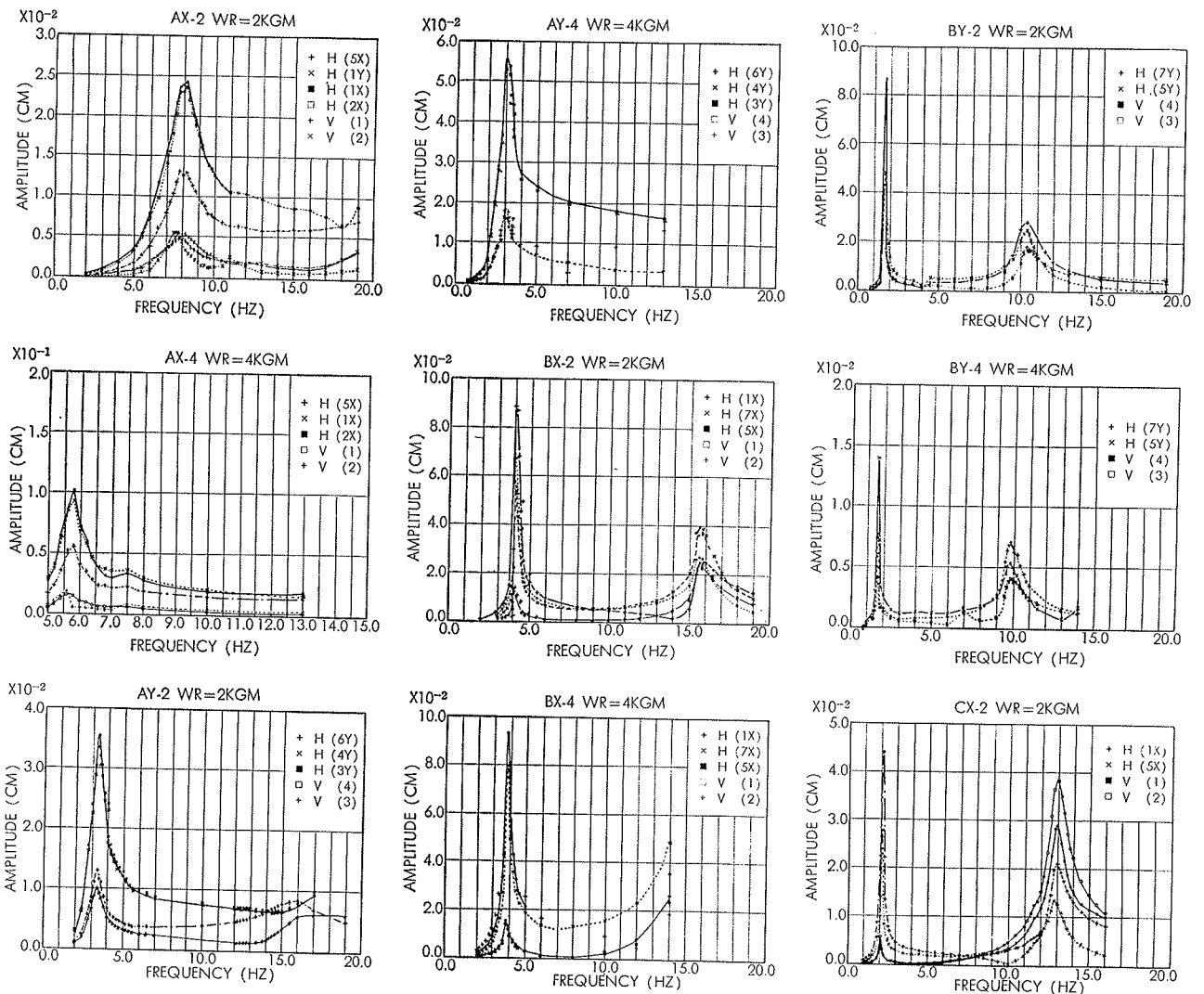


図-5 各CASEの共振曲線

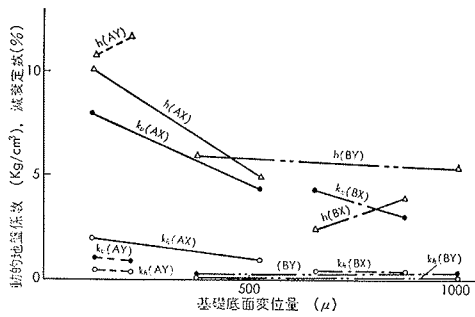


図-5 変位と値および減衰定数

もX方向加振時の方が小さくなる傾向がみられる。すなわち、Y方向加振時の方がロッキング振動が優勢であることを示している。この傾向は後述する杭の歪み測定結果からも認められる。図-6では、A状態については変位の増大に伴うK値の低下が顕著であるが、B状態に関しては緩やかである。すなわち、B状態における基礎の挙動は、杭の剛性に影響される割合が非常に大きいといえよう。

5.2 杭の歪み測定について

鋼管杭2本のうち1本を歪み測定用として、図-1に示す如く1断面当り4点、1mピッチで12断面に箔歪みゲージ(共和KFC-5-C<sub>1</sub>-11)を貼付した。歪み測定用の杭にはゲージプロテクターとして溝型鋼を全溶接したので、他方の杭にも同様の処理を施し、2本の杭の剛性が等しくなるよう配慮した。杭打ち前に実施した杭の曲げ試験結果から、2本の杭の剛性はX、Y方向共にほぼ等しいことが確認されている。

歪みの測定はA、B、Cの各状態共、起振機による強制振動時(偏心モーメント 4kg・m)に行う予定であったが、C状態のY方向に関しては振幅が過大となり危険が予想されたので、これを人力加振による自由振動時に変更した。また、A、B状態共、歪み測定と同時にフーチング上において水平および上下の変位を、フーチング底部において水平変位を、さらにB状態についてのみフーチング底部より85cm下方の杭面上において水平変位を測定した。C状態に関しては変位量が大きく、計器の許容範囲を越えたので測定不能となった。

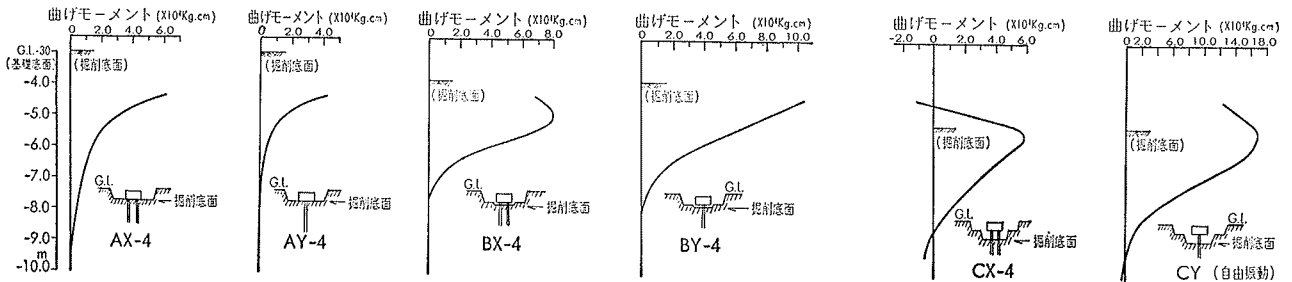


図-7 曲げモーメント分布曲線

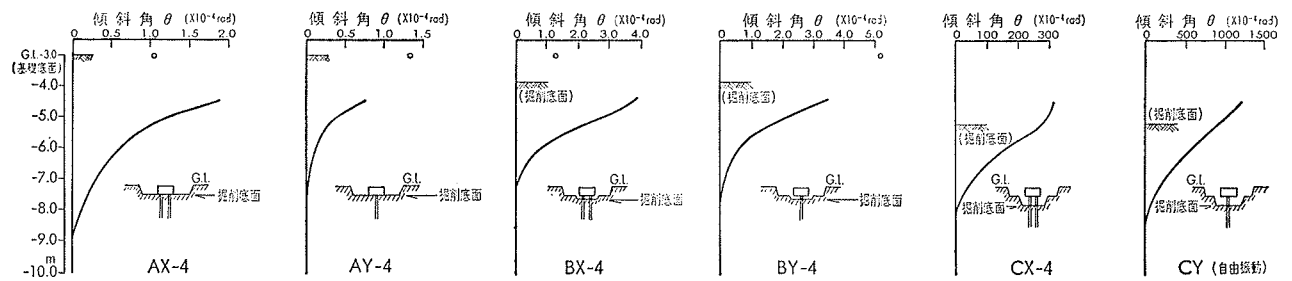


図-8 傾斜角分布曲線

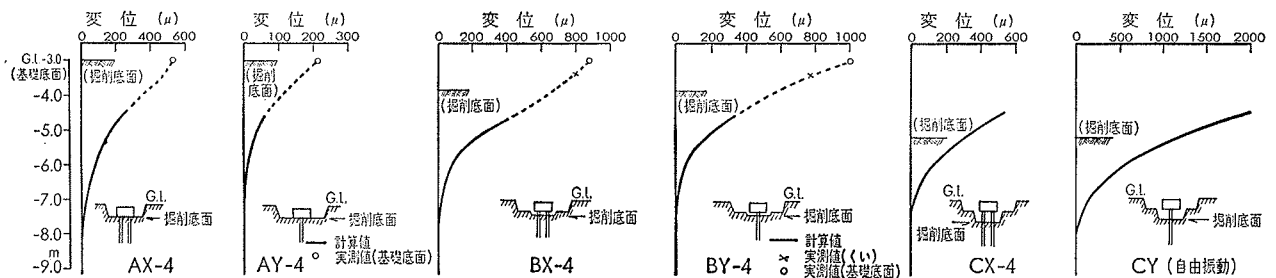


図-9 変形曲線

図一7に各ケースの基礎共振時における杭の曲げモーメント分布を、また図一8にこれを図上で1回積分して求めた傾斜角分布を示す。図中○印はフーチングのロッキングのモードから計算した傾斜角である。これをA、B状態について杭の傾斜角分布曲線の最上部の値と比較すると、X方向加振時においてはフーチングの傾斜角の方が小さく、Y方向加振時においては逆の傾向を示している。すなわち、X方向加振時には杭頭部の固定度が高いために杭はセン断型の変形を示し、またY方向加振時には杭頭部は自由の状態に近く、曲げ型の変形を示しているものと推測される。この傾向は図一9に示す杭の変形曲線に明確に現われている。同図は曲げモーメント分布曲線を図上で2回積分して求めたもので、図中○印はフーチング底部において、×印は杭面において測定した変位量である。杭の変形曲線の延長上に実測値がよくのっている。また、歪みの測定結果によると、Y方向加振時には杭の軸歪みがほとんどみられないが、X方向加振時には杭上部に軸歪みが生じており、フーチングの回転に対して杭が軸力によって抵抗していることがわかる。同一水平力に対する変位量について頭部固定杭と頭部自由杭を比較すると、前者の変位量は後者より小さく、したがってみかけのバネは前者の方が大となることは明らかである。本実験結果から得られた水平方向の地盤反力係数に関しても、表一1に示す如く全く同様な傾向がみられる。

5.3. LLT試験結果、およびN値と動的地盤係数との関係について

本地盤の上部砂層において実施したLLT試験結果およびN値から求めた水平方向の地盤反力係数と、本実験結果から得られた水平方向の動的地盤係数との関係について簡単な検討を試みた。以下にその一例としてAX-2の場合について述べる。なお、A状態において、杭の水平抵抗に支配的な影響を与える地盤は上部砂層であると考えられる。

基礎共振時の振動数およびモードから、フーチングの重心位置に作用する慣性力は杭1本当り1.06 tonとなる。このときのフーチング底面位置における杭の水平変位量は122μであるから、chang式によって水平方向地盤反力係数k値を計算するとk=17.34kg/cm<sup>3</sup>となる。一方、LLT試験結果から今井の提案する下式によって杭面変位1cmのときの基準k値k<sub>1</sub>を求めると16.8kg/cm<sup>3</sup>となる。

$$k_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{2r_0 \cdot (r_m - r_0)^2}{B}} k_m$$

ここに k<sub>m</sub> : LLT の測定 k 値

r<sub>0</sub> : LLT の初期半径

r<sub>m</sub> : k<sub>m</sub> を求めた中間半径

B : 杭幅

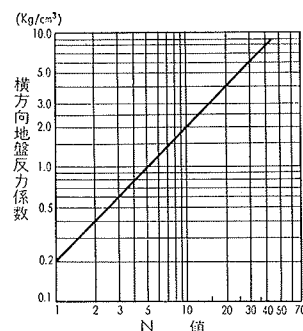
同じく LLT 試験結果から吉中の提案する次式によって、杭の基礎変位を地表面で約1cmとしたときのk値k<sub>2</sub>を求めるとk<sub>2</sub>=9.8kg/cm<sup>3</sup>となる。

$$k_m = \frac{1}{1.2} \cdot E_m \cdot \frac{1}{B^{\frac{3}{4}}}$$

ここに E<sub>m</sub> : 孔内水平載荷試験から得られる地盤の変形係数

また、上部砂層のN値(=50)から図一10<sup>2)</sup>によって水平方向地盤反力係数k<sub>3</sub>を推定すると10kg/cm<sup>3</sup>となる。また、本地盤において実施した弾性波試験結果によると、上部砂層における弾性波速度Vsは、163m/secである。これより地盤のヤング係数を求め、Mindlinの式によって杭面の反力係数E<sub>sh</sub>を計算するとE<sub>sh</sub>=2000kg/cm<sup>2</sup>となる<sup>3)</sup>。ここで、E<sub>sh</sub>=k<sub>4</sub>Bとするとk<sub>4</sub>=47.8kg/cm<sup>3</sup>となる。

以上、A状態について実験結果から逆算したk値と地盤調査結果から推定したk値との比較をまとめて表一3に示す。同表について有効質量、基礎底面の付着抵抗、および振動実験と各地盤調査における地盤の歪みレベル



図一10 N値とK値との関係

の相違等の問題はありますが、地盤調査結果から水平方向地盤反力係数を推定する場合の一資料として報告する次第である。

起振機の重心 モノント	加振 方向	基礎底部の 変位量	振動実験結果か ら逆算したk値	LLT試験結果から 求めたk値		N値から図表に よって求めた k値	弾性波試験結果か ら、Mindlinの 式によって求めた k値
				今井法	吉中法		
2kg・m	X	122μ	17.34kg/cm <sup>3</sup>	16.8 kg/cm <sup>3</sup>	9.8kg/cm <sup>3</sup>	10kg/cm <sup>3</sup>	47.8kg/cm <sup>3</sup>
	Y	126	12.65				
4kg・m	X	525	6.47				
	Y	213	7.94				

表一3

最後に本実験の実施およびデータ処理に際し、ナショナル電設(株)宮地繁吉、日本検査コンサルタント(株)伊波弘彰氏の御協力を得たことに対し謝意を表します。

参考文献

- 1) 有江義晴：荒川放水路における鋼杭の水平抵抗：土と基礎 Vol.18. No. 9(1970)
- 2) 横山幸満：鋼杭の設計と施工 山海堂
- 3) 土質工学会編：土と構造物の動的相互作用