

III-6 杭の動特性に関する波動論的考察

東京工業大学大学院 ○白砂 健

住友建設株式会社 本間秀世

東京大学地震研究所 伯野元彦

1. はじめに

構造物の基礎は杭に限らず耐震設計上、最も重要な部分であるが、その動特性に関しては未知の分野が多い。従来の考え方は、図-1に示すように杭の周囲に杭と一体となって振動する土を付加してそれを地盤係数と称するバネで支持したモデルで象徴されている。そして、耐震設計に当たっても、このモデルに震度法を適用することが多い。たしかに振動時に杭周辺の土の一部は杭と一緒に動くであろう。しかし、このモデルに震度法を適用することは異論もある。

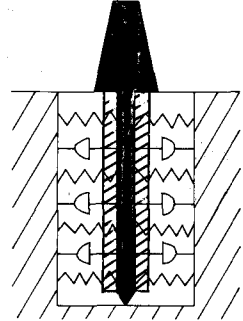


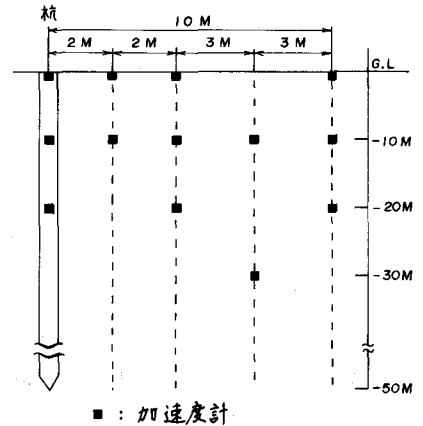
図-1 杭のバネ-ダッシュポットモデル

我々は、杭周辺の土と一緒に運動するのは見掛けに過ぎず、杭から弾性波動となって四方へ逃げて行く時、その反力として杭を支えているのだという見方をしたい。

その観点から次に述べるような実験と理論研究を行なった。

2. 杭の振動実験

従来、杭の振動実験は数多く行われて居り、その目的とするところは、主として固有振動数その他にあり共振曲線を得ることであった。我々の実験の主目的は、前述したように、杭周辺の土の動きを知ることにあつたので、計器を主として、杭付近の地中に埋設した。図-2に示したように、直径



■ : 加速度計

60cmの鋼管杭から加振方向に2m, 4m, 7m, 10m離れた点にボーリング孔を掘りその中の深さ30m, 20m, 10m, 地表の各点に加速度計を設置した。杭中は深さ20m, 10m, 地表の各点に設置した。

杭を振動させるには偏心重錘型起振機を用いたが、これは建設省土木研究所から借用したものであって、起振力最大15ton, 起振振動数最大10Hzである。

実験の種類

振動実験の種類は、次の二種とした。

i) 定常振動試験

これは、起振機の振動数を一定として、起振するもので共振曲線を描くには次々と振動数を段階的に変えて行く。

ii) スイープ試験

これは、起振機の振動数を自動的に(低→高)、(高→低)という具合に一定速度で変化させて行くもので、共振曲線などは短時間で得られる。しかしながら、この試験方法の弱点は、振動系が線形であっても、共振曲線の形状、とくに共振振動数の値が(低→高)、(高→低)の兩者に対して異なってくる点である。

起振力の大きさ

この起振機の出し得る力の最大は既に述べたように、約10Hzで15 tonであるが、我々の実験では、振動試験結果に与える起振力の大きさの影響をみるため、

(A) 最大起振力, (B) 最大起振力 $\times 0.5$, (C) 最大起振力 $\times 0.1$

の三つの起振力の大きさで実験を行った。

勿論、起振機は偏心重錘型であるから、起振力の大きさは振動数の二乗に比例している。

3. 振動実験結果とその考察

実験の結果から知られた新しい事柄としては次のようなものが挙げられよう。

A) 杭および杭周辺の地盤とも、杭頭を起振させている本実験の場合には、地表面が大きく振動し、地下10 mでは地表面の $1/10$ 以下になり、地表面とは反対方向に振動していることが多い。

B) 周辺地盤中の振動形状も、たかだか杭から10 m位の距離までは杭の振動形状とほぼ同一の振動をしているが、振動数が高くなると(10 Hz 近辺)、周辺地盤が杭とは逆位相で振動している例も少数あった。

C) 最大起振力で加振した場合には、共振振動数付近で大きなパワーをくわれるため、モーターがついていくことができず、スイープ試験の場合には、共振点付近の振動数では振動せず低振動数からいきなり高振動数へ、高振動数からいきなり低振動数へという現象が見られた。

D) 周辺地盤の地表面に関して、杭から25 m, 50 m, 100 mの地点においても測定したが、何れの測点においても、それほど高振動数でなければ、杭とはほぼ同一の位相で振動していた。

E) 起振機の振動数を漸増したスイープ試験の結果をみると、地盤中の測点によっては、振幅が極大になる振動数が異なっていた。これは、周辺地盤も杭と全く同一に振動しているのではなく、特有の振動形状を持って振動しているため、振動数によってその振動形状が変わり、全測点同一の振動数で極大値をとらないのではないと思われる。これは、D)で述べたことと矛盾するようであるが、本項の見方はミクロに見ればということである。

F) これは前項に関係したことであるが、通常の共振曲線は起振力の補正をしなければ、共振点付近以外の領域でも振動数の二乗に比例して振幅が大きくなるものであるが、本実験の場合、地表面ではたしかに振動数の二乗に比例して振幅が増大して行く傾向にあったが、地中では振動数によらず、ほぼ一定値をとっていた。

G) これまた、E)項に関係するものであるが、地中における共振曲線には、極大値が一個に限らず二個ある場合が多かった。(図-3, 4参照) これも地盤自身の振動モードと杭の振動形

状が複雑にからみ合った結果を示しているのであろう。

H) 結局、杭の周辺地盤は従来付加質量として評価されていた量より多くの土が一緒に動いており、波動論的立場から現象を解明しなければならないと痛感した。

共振曲線

図-3, 4は共振曲線の一例として杭から4m離れた地表面と、深さ20mの両測点におけるものを描いてあるが、まず地表面の振動加速度の方が大きいことがわかるし、図の二本の曲線は起振振動数を(低→高)に変えた場合が白丸に、(高→低)に変えたものが黒丸に対応しているの、行きと帰りの共振曲線が異なっていることも知られる。

また地盤中でもかなりの共振現象があるということも知られる。

振動モード

共振時の杭ならびに周辺地盤中の振動モードの一例を描いたのが、図-5である。

周辺地盤も杭とはほぼ同一形状で振動していることが知られる。

4. 理論的検討

図-1に示されているようなスプリング・ダッシュポット系で置き換えて杭の動的解析を行う場合、波動解を用いて、これらバネ定数、減衰定数の値を定めることもできる。

我々が考案したこれらの値を定めるための方法は、半無限弾性体内の水平一点加振解を求めて、単位振幅でそれが振動した時の反力を求め、その反力の実部をバネ定数に、虚部を減衰項に置くというものである。¹⁾

半無限弾性体内一点加振解は、既に数年前の年次講演会で発表したように

A) Lamb の無限弾性体内一点加振解を半無限弾性体の表面を対称面とする鏡像関係となるように2個加え、

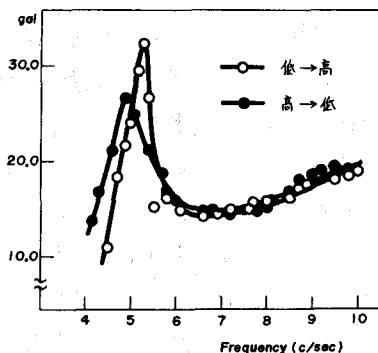


図-3 共振曲線(地表, 杭より4m)

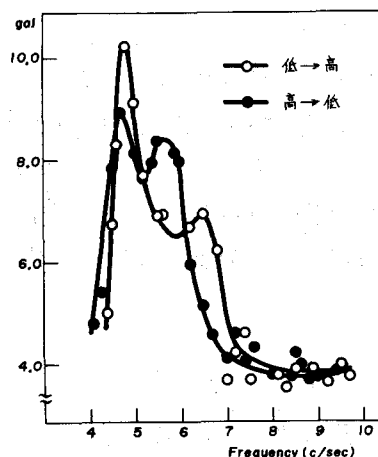


図-4 共振曲線(地中深さ20m, 杭より4m)

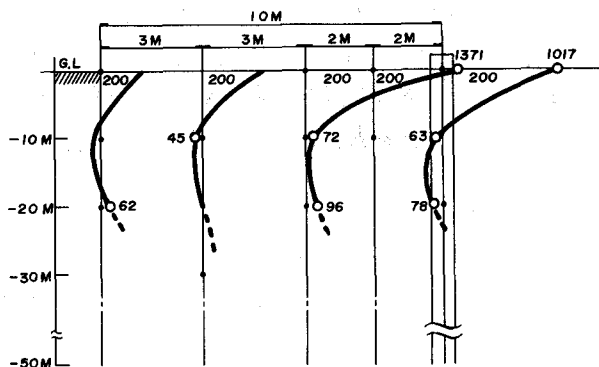


図-5 共振時振動形状

B) 対称面に生じた直応力を打消すように表面加振解を加えるという図-6に示したような計算過程で計算を行う。

B)の数値計算は複素無限積分となるため非常に計算時間を取り、現在未だ完成していないので、A)の計算のみを行なった状態でバネ定数その他のを決定し、杭の振動形状を求めたのが図-7である。

何もこのような面倒なことをしなくても、振動形状そのものは、(つまり、地表面のみ大きく振動し地中では殆んどゆれないという特長をもった) い、加減なバネ定数を使っても大差ない結果が得られるのだが、問題は減衰定数である。この方法によれば、反力は複素数で与えられるので自動的に減衰性も組み込まれてしまう。また杭とか、ケーソンなども串団子のようにモデル化してしまうので形状が複雑であっても可能であるという長所がある。

ただ 短所としては、現在のところ、半無限体の場合しかできていないので、沖積層のように表層中に杭がある場合など一寸困るという点と、数値計算のB)の過程が非常に計算時間をくうという点である。後者の欠点は、問もなく何らかの解決策を発見できるものと思っている。

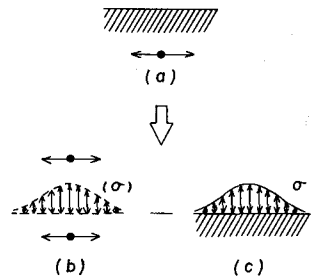


図-6 半無限体内一点加振解の求解法

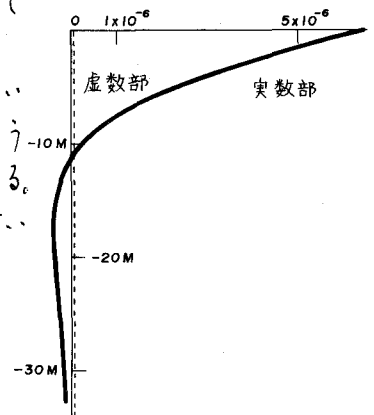


図-7 振動形状の数値解

参考文献

- 1) 伯野元彦 「杭基礎の振動減衰性についての波動論的考察」
昭和42年土木学会年次学術講演会 I-188
- 2) H. Lamb 「On the Propagation of Tremors over the Surface of an Elastic Solid」
Philosophical Transactions, A, vol. 203, 1904 PP1~42
- 3) 田治見宏 「深い基礎を有する構造物の地震応答について」
日本地震工学シンポジウム, 1966, PP255~260