

3. 土と構造物の相互作用

東大土木 石原研而

まえがき

地震動によって基礎が動くとき、その波動は地表附近の軟弱層によって増中されて地表面に達する。地表面上、又はその中に構造物の基礎が存在すると、この波動はその影響を受けて更に變形さへる。従つて、基礎体が存在する場合の地表面の振動は、それが無い場合の運動に比べて、かなり異なつたものになつてくる。土と構造物の相互作用はこのような振動の差異に支配され、地震時に基礎体に加わる力もこれによって決まるものと考へられる。さて、この振動の差異は、一般に軟弱層の性格と基礎体の状況に応じて変わつてくるものである。従りて、土と構造物の相互作用を調べるためには、この2つの振動要素を適切にモデルで表現することが必要となつてくる。図1に示してあるのは、このために提案された2自由度の振動系である。軟弱層の土の重量を m_g 、その變形特性をバネ K_g とダッシュポット C_g で表現してある。基礎体の重量は m_f 、これと地盤との相對變形特性はバネ K_f 、ダッシュポット C_f で表わされている。全体のモデルは地盤系のもつと基礎系のもつと2つ直列に並べたものである。このモデルによつて、耐震委員会で報告された研究内容を2つに分けよと次のようになる。

- (1) 地盤系と基礎系の連成挙動………2自由度系全体の振動挙動を對象としたものである。
- (2) 基礎系の振動挙動………地盤に対して基礎が相對的にいかなる応答を示すかを調べたもの。

以下、この順序でその内容の概要を述べて行くことにする。

I. 地盤系と基礎系の連成挙動

地盤全体を振動させる実験は理位置では実行困難なもので、振動台を用いた室内実験によって応答特性が調べられた。

(i) 杭基礎の振動特性について。(久保慶三郎)

長さ10m、巾2m、深さ3mのモデル地盤をシンダーサンドに絶縁油を混入した材料を用いて作った。その中に外径10cm、長さ3mの中空アルミ合金から成る杭9本を埋めて、群杭基礎とした。最大4.5tonのコンクリートブロックをこの上へのせ、全体を振動台として加振した。振動幅を増して行くと1.7cpsで杭基礎が共振を起し、地盤に相對的に杭が激しく揺れるのが見られた。この状態は図1のモデルで云うと、地盤系の固有振動数より基礎系のもつと小さく、後者に關する共振が起つたことに相當する。次に振動数が12~13cpsになると、地盤自体が杭体に対して相對的に激しくゆれ、杭基礎に大きな応力を誘起する状態が表れた。今度は地盤系の固有周期に加振周期が一致したために地盤の共振が生じたものであるが、この状態では杭の下部まで

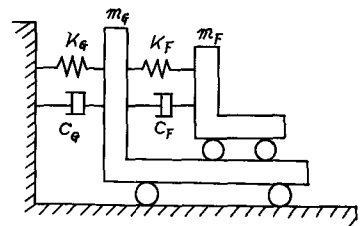


図1 地盤と基礎の振動モデル

の固有周期に加振周期が一致したために地盤の共振が生じたものであるが、この状態では杭の下部まで

大きな応力が生じることが確認された。

(ii) 杭の附加質量について。(山下生比古)

1.5×1.5×1.5mの振動箱の中に小名浜砂をつめ、巾10cm、厚さ1cm、長さ7, 15, 30cmの3種類のモデル杭を製作した。その上に50kgの重量をのせ、杭頭からの加振試験と地盤全体をゆする振動台試験の両方を行い、杭の挙動を観察した。振動台実験において、加振振動数を小さくして行くと、7cm長さの杭の場合、25~35cpsで地盤の共振がおこり、31cmにつき40cps附近で杭体の共振が生じた。この方法でとれた杭体の共振振動数は、杭頭からの加振試験により求められた値とほぼ一致することが確かめられた。以上の結果にもとづき、図1に示すようなモデルで杭と地盤の振動挙動を説明できることを提案している。以上、2つの研究結果より、今まで、余り重視されなかった地盤の共振の様相が或る程度明らかになり、これにより、土中の基礎の深部にいたるまで、大きな外力が加わりうることが指摘された。

II. 基礎系の振動挙動

地盤上の基礎に起振機で強制振動を与え、この時の加振力と変位を測定すれば、地盤と基礎の相互作用の特性を知るのに役立つ。これは図1で質量 m_F に強制外力を加えることに相当するが、地盤系全体を加振することは不可能なので、もっぱら基礎系のみ応答特性がえられることになる。この種の問題は地震とは無関係に、機械基礎の諸問題に関連して古くから研究されてきている。従って、この分野での理論的、実験的成果を学んで参考にすることは意義深いと考えられる。

(i) 半無限弾性地盤上の剛体基礎の振動について。(岩崎敏男)

半無限体上に置かれた基礎の上下、捻り、ロッキング振動について詳しい報告が行われた。こゝでは特にロッキング振動についての結果を、多少訂正して紹介し、後の考察に役立てたいと思う。半径 r_0 、質量 m_F の基礎が図2のように回転運動をしているものとする。慣性モーメントを I_0 、回転角を θ 、とすると、この運動は次のような1自由度の振動方程式で表すことができる。

$$I_0 \frac{d^2\theta}{dt^2} + r_0^4 \sqrt{\rho G} \frac{d\theta}{dt} + G r_0^3 I_1 \theta = M e^{i\omega t} \dots (1)$$

ただし、 G は地盤土の剛性率、 ρ は土の単位容積質量、 M は外力モーメント、 ω は角振動数である。 I_1, I_2 は ω とポワソン比で決まる量である。この式で決まる振動増幅率を振動数に対してプロットしてみると図3のようになった。横軸には振動数によつて、

$$a_0 = r_0 \omega \sqrt{\frac{\rho}{G}} \dots (2)$$

で定義される a_0 なる量をえらんでグラフが描かれている。この量は土中の波の波長 λ を用いて、 $a_0 = 2\pi r_0 / \lambda$ と書きかえることもできる。従つて、 a_0 は基礎の横寸法に比して波長が長くなると小さくなるような量であると理解しておくとよい。一般に、 a_0 は1より小さいことが多い。次に、図中の B_θ は基礎体の形で決まり、

$$B_\theta = \frac{3(1-\nu) I_0}{8 \rho r_0^5} \dots (3)$$

で定義される。 ν はポワソン比である。今図2のように高さ h の円盤状基礎を考え、接地面の中心

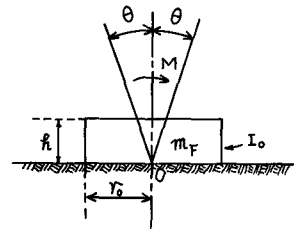


図2 基礎のロッキング振動

に關する慣性モーメントを求めこれを(3)式に代入してやると、

$$B_0 = \frac{3}{8}(1-\nu)\pi \frac{r}{r_0} \left(\frac{1}{4} + \frac{1}{3} \frac{r}{r_0} \right) \dots\dots(4)$$

がえらる。ただし、基礎体材料の単位容積重量は土のそれと等しいものと仮定した。次に、基礎体の全表面積に対する土に接する部分の面積の比率を S_c とすると、これをを用いて、(4)式は、

$$B_0 = \frac{1}{64}(1-\nu)\pi (S_c-2)(2S_c-1) \dots\dots(5)$$

のように書きかえられる。ただし、 $S_c = 2\frac{r}{r_0} + 2$ 、より、 S_c は2より大きな値でなくてはならない。

(4)、(5)式より、 B_0 の物理的意味を次のように解釈することができる。

α) 基礎体の高さか巾に比して小さいほど B_0 が小さく、その逆も又云える。

β) 基礎体の全表面積中、土に接している部分の面積が大きいほど B_0 が小さく、その逆も又云える。

以上の考察により、 B_0 は基礎体の形状又は接地状態によって一義的に決まるものであることがわかった。さて、共振点の固有振動数に相当する a_0 の値を a_n とあくと、これは(1)式と(2)式より、

$$a_n^2 = \frac{3(1-\nu)}{8} \frac{F_1'}{B_0} \dots\dots(6)$$

と与えられる。 F_1' は a_n の函数であるので(6)式を解くことにより、 a_n を B_0 の函数として一義的に決めることができる。図3から明かなように B_0 が増すと a_n が小えて共振振動数は増大する。次に減衰について考えてみよう。これは(1)式からわかるように振動数の函数であるので、特に共振点の減衰に着目してみると、これも B_0 のみの函数として表わしうることが示される。図3からも推察できるとおり、 B_0 が小さいほど減衰率が大きくなることわがわ。以上の考察より、固有振動数に關係した a_n と、減衰率と、共に B_0 の値によって決まってしまうことがわかった。次に附加質量について考えてみよう。地盤に静的モーメントを加えることによってえらるバネ常数 k_0 は次式によって与えられた。

$$k_0 = \frac{8G r_0^3}{3(1-\nu)} \dots\dots(7)$$

これと慣性モーメントから求めらる固有振動数を ω_s とすると、明らかに $\omega_s^2 = k_0/I_0$ である。

(2)式の ω の代りに ω_s を代入した量を a_s として、固有振動数を表わす(6)式を變形すると、次式がえらる。

$$\frac{a_n^2}{a_s^2} = \frac{3(1-\nu)}{8} F_1' \dots\dots(8)$$

F_1' は a_n の函数なので(8)式を一般的に解くのは必ずしうが、 $\nu=0$ の場合には近似的に次のようになる。

$$\frac{a_n^2}{a_s^2} = 1 - 0.048 a_s \dots\dots(9)$$

この式より、實際の固有振動数は、静的スプリングを形式的に用いて求めた固有振動数より小さくなる

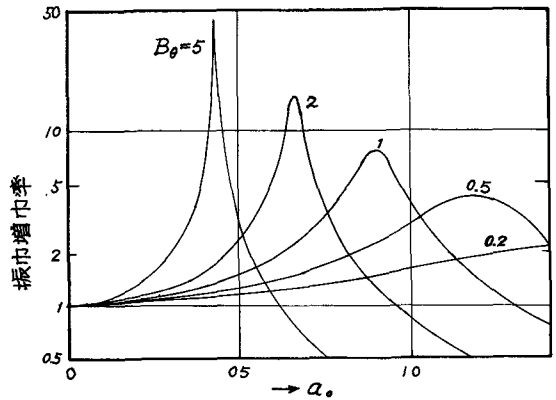


図3 半無限弾性体上の剛体のロッキンク振動に關する振巾増巾率

ることがわかる。しかも、その差は α_2 が大きい程著しいことがわかる。これが、理論的に算出される附加質量の効果である。以上のように、この効果は共振振動数が大きいほど著しいが、この時は、前述のように減衰が大きくなって、共振曲線が平坦になる場合である。つまり、實際上共振による悪影響が問題にならない時で、しかも共振振動数を正確に求めにくい場合に附加質量の影響が大きくなり、共振が明確に表われる場合には、附加質量が小さい、ということになるのである。この結論は、半無限体上の剛体基礎に限らず、以下にのべる杭等の深基礎に対しても、定性的にあてはまると考えられる。

(ii) 杭基礎の振動特性について。(久保摩三郎)

概要はすでにのべたので省略することにして、17cpsで杭基礎が共振を起した時の模様をみてみる。静的載荷試験によって杭の横方向バネ常数を求め、これによって固有振動数を計算してみよう、実測値と比較のよく一致した。杭頭に負真をのせた方式の振動実験では、負真の重心が地上にあり、 B_0 の値が大きく、固有振動数も小さいために、附加質量の値が小さく、計算値と実測値が一致したと考えられる。

(iii) 杭の附加質量について。(山下生比古)

杭頭で加振した実験(前述)によると、杭体で測定した歪が 3×10^{-4} 以下では附加質量を考慮しないことと実測値と計算値(静的バネによる)が一致するが、これ以上の大きな歪では両者の値がよく合うことが判明した。歪が小さいと、杭体は地盤土に密着して振動するから B_0 の値が小さく、減衰の値が大きくなる。従って附加質量を考慮する必要が生じたものと思える。歪が大きいと杭と土の間にスキ間が生じて、接触面積が減り、事實上、 B_0 の増加をもたらし、従って、附加質量が減って、共振振動数に関する理論値と実測値が一致したものと考えられる。

(iv) 動地盤反力係数。(野口俊郎)

関東ローム地盤上に設置した重さ3~14tonのコンクリートブロックに起振機で強制振動を与えて各種の測定を行った。 B_0 の値が1.6, 0.3, 0.15の3種類の基礎でまた、ロッキング振動時の附加質量は、この順序で大きくなることが示された。又、上下、ロッキング振動の共振振動数より求めた、水平方向と上下方向のバネ常数の比は0.5~0.6の範囲にあることが判明した。

(v) 杭の附加質量についての一つの試み。(佐藤暢考)

杭と地盤とを水平なスライスの重なりと考え、その一つを取出して、2次元の弾性変形をずらし、杭に適當な質量を与えて、スライスの固有周期を有限要素法によって求めた。一方、静的計算で求めたバネ常数を用い、動的固有周期に一致すべく附加質量を計算した。その他、2種類の仮定によらずに附加質量を求めたが、いずれも、計算の領域の広がりと共に、これが増加し、一定の終端に達しなかった。

お す び

以上、附加質量について、重真的にのべてきたが、理論的にも実験的にも、これは実験に用いた基礎の形状や接地状態によって変わるようである。将来、この真をもっと研究すべきだと思える。

参 考 文 献

- (1) 久保摩三郎・佐藤暢考、"杭基礎をもつ構造物の耐震性"、生産研究、20巻4号(1968)
- (2) I. Yamashita, T. Inatomi, "Virtual Mass of Laterally Loaded Piles", Proc 3rd J.N.S.E.E.
- (3) 野口俊郎他、"関東ローム動的地盤反力係数測定について"、第5回土佐工学研究発表会。