

3. 起振実験結果

3-1 起振実験結果

模型ブロック基礎を「埋戻しなし」「半埋」「全埋」の状態で水平方向に加振した場合の基礎頂部の水平応答変位について共振曲線（単位加振力あたり）と起振力に対する位相曲線を図-5 (a) (b) に示す。埋戻しの増加に伴い、変位応答は著しく減少し、「全埋」の場合は「埋戻しなし」の場合と比較して共振時の変位応答は約1/30程度となっている。また、位相曲線において90°を示す固有振動数は埋戻しの増加に伴い、5.8Hz、8.4Hz、14.7Hzと増大している。

埋戻しの有無による基礎の挙動を詳細に調べるため、計測された応答値を基礎重心位置での水平成分と回転成分に分離した。その水平変位と回転角（単位加振力あたり）の共振曲線を図-6 (a) (b) (c) に示す。「埋戻しなし」の場合は、1次のロッキング振動が5.9Hz、2次が13.0Hz見られ、水平変位・回転角とも1次において卓越している。一方、「半埋」の場合は、1次が7.7Hz、2次が12.0Hzであり、水平変位は1次でピークを示すが、回転角は1次より2次の方が大きくなっている。さらに「全埋」の場合は、9.9Hzで回転角がピークを示すのに対し、水平動にはピークが見られず、振動数が高くなるにつれて減少する傾向を示している。しかしながら、位相曲線より10Hz付近が水平動の固有振動数であることが確認されており、水平動の減衰が特に大きいことを示している。

次に、図-7 (a) (b) に振動台基礎を水平方向に加振した場合の基礎重心の水平変位と回転角について共振曲線（単位加振力あたり）と位相曲線を示す。回転角は6.5Hzにピークを示すが、水平変位ではピークが見られず、振動数が高くなるにつれて減少し、模型ブロック基礎の「全埋」の場合と同様な傾向を呈している。

さらに、埋戻しの有無による減衰定数の変化を調べるため、上記の実験結果に1自由度系の理論解を適用し、水平動・回転動について個々にモードの減衰定数を求めた。その結果を図-8に示す。同図より、水平・回転モードの減衰定数は「埋戻しなし」の場合で7～8%、「半埋」で20%前後、「全埋」では75%に達し、側方を埋戻すことにより減衰が非常に大きな振動系となることがわかる。ただし「全埋」の回転動については1自由度系では表現できなかった。

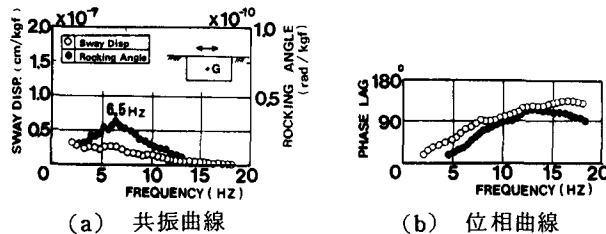


図-7 水平変位と回転角（振動台基礎）

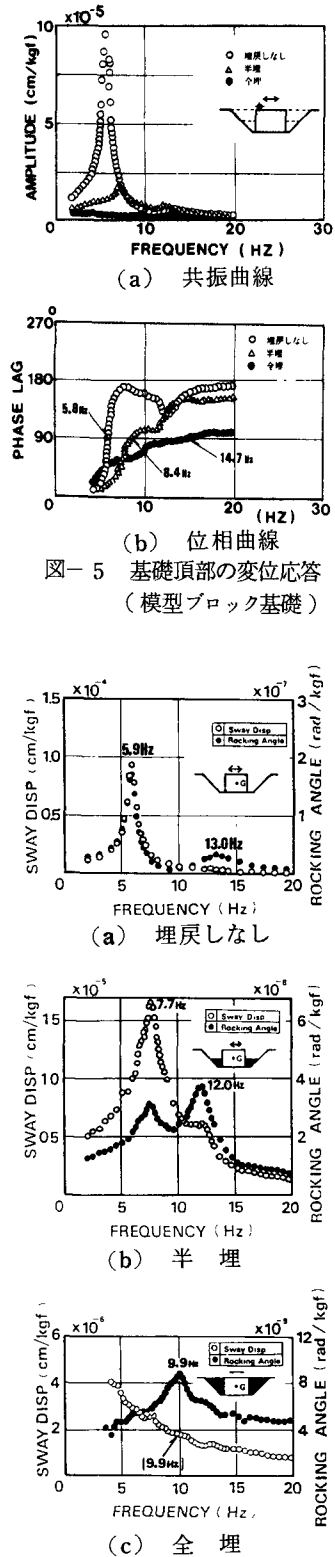


図-6 水平変位と回転角（模型ブロック基礎）

3-2 複素剛性による評価

側方の埋戻し効果を定量的に評価するため、図-9に示すモデルを仮定した。運動方程式は次式で表現できる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & I_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{HB} + K_{HS} & -K_{HB}S - K_{HS}(S - \frac{1}{2}) \\ K_{HB}S - K_{HS}(S - \frac{1}{2}) & K_{RB} + K_{RS} + K_{HB}S^2 + K_{HS}(\frac{1}{3} - LS + S^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \theta \end{bmatrix} = m r \omega^2 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} e^{i\omega t} \quad (1)$$

u : 水平変位
 θ : 重心まわりの回転角
 M : 基礎の質量
 I_G : 重心まわりの慣性2次モーメント
 mr : 起振機の偏心モーメント
 ω : 円振動数

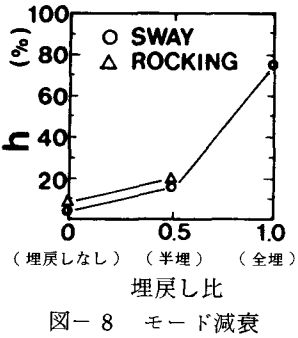


図-8 モード減衰

側面の複素剛性 ($K_{HS} = K_{HS} + iK'_{HS}$, $K_{RS} = K_{RS} + iK'_{RS}$) は、「埋戻しなし」の場合に算出した底面の複素剛性 ($K_{HB} = K_{HB} + iK'_{HB}$, $K_{RB} = K_{RB} + iK'_{RB}$) を既知量とし、(1)式を用い算出した。

図-10(a)、(b)に水平方向の複素剛性を示す。「埋戻しなし」の場合は底面の複素剛性 (K_{HB} , K'_{HB}) を、「半埋」「全埋」については側方の複素剛性 (K_{HS} , K'_{HS})、すなわち側方埋戻しによる増加分を示してある。同図より底面の複素剛性のバネ項を表わす実部 (K_{HB}) は10Hz付近までは一定もしくは振動数が高くなるにつれてやや増加し、それより高い振動数では減少の傾向を示す。減衰項を表わす虚部 (K'_{HB}) は振動数が高くなるにつれて2次関数的に増加している。

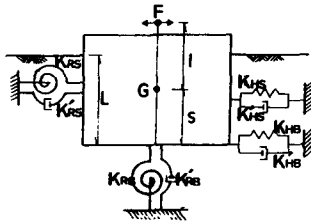
側面の複素剛性については10~12Hzを境にしてその振動数特性が変化している。回転動の卓越する振動数が「半埋」で12Hz、「全埋」で9.9Hz (矢印で図示、図-6参照)であることを考えれば、バネ項 (K_{HS}) については、「半埋」「全埋」の場合とも回転動が卓越する振動数より小さい範囲ではほぼ一定値を示し、その大きさは埋戻しなし」の場合の底面の値の約0.5~1倍程度である。それより高い振動数域では振動数が高くなるにつれて増加する傾向を示す。一方、減衰項 (K'_{HS}) については、回転動が卓越する振動数までは「半埋」「全埋」とも振動数が高くなるにつれて増加している。特に全埋の場合の増加が著しい。それより高い振動数域では一定もしくは減少の傾向を示している。

さらに、次式により算出した側方地盤の水平方向の減衰定数 h_{HS} を図-11に示す。なお、「埋戻しなし」の場合は底面の値を示した

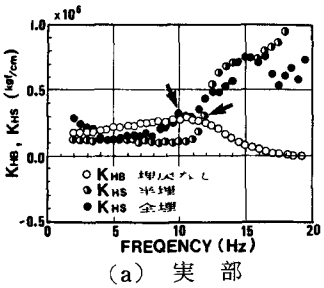
$$\frac{h_{HS}}{1-h_{HS}^2} = \frac{K'_{HS}}{2K_{HS}} \quad (2)$$

各埋戻しケースとも減衰定数は振動数が高くなるにつれて大きくなり、それぞれの1次の固有振動数における値は、「埋戻しなし」で4% (5.9Hz)、「半埋」で3.7% (7.7Hz)、「全埋」で6.3% (9.9Hz) である。

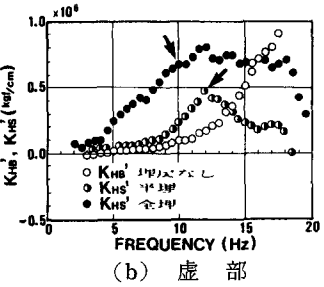
以上の結果より、埋戻された基礎は埋戻しのない場合と比較して減衰が非常に大きくなるため、応答が著しく減少することが確認できる。



SWAY-ROCKING MODEL
図-9 モデル図



(a) 実部



(b) 虚部

図-10 水平動の複素剛性

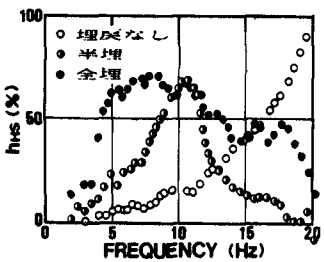


図-11 減衰定数

3-3 動土圧による考察

本節においては、振動時の基礎に作用する動土圧から求めた地盤反力係数と S-R モデルから求めた複素剛性を対比する。

振動台基礎側面と底面における動土圧分布の一例を図-12に示す。底面土圧および側面土圧は近似的に三角形分布を示し「片押し・片引き」の状態で作動していることがわかる。

図-13は上述の動土圧分布から基礎側面のバネ定数を(3)式を用いて算出し、その振動数特性を示している。ここで求まる k_H' は側面全体のバネ定数と考えられる。その算定には基礎側面の動土圧を深さ方向に加算した値と基礎重心位置の変位を使用した。

$$k_H' = \frac{P}{u} = \frac{P_0}{u_0} e^{-i\theta} \quad (3)$$

ここに $P = \sum_{k=1}^4 P_k e^{i(\omega t - \theta_k)} \cdot A_k$ $u = u_0 e^{i\omega t}$

ここに、 P_k , U_0 , k_H' は土圧振幅、変位振幅、バネ定数の絶対値を示し、 ω は角振動数、 t は時間、 θ は位相遅れ角、 A_k は土圧計の分担面積を示している。また、同図には S-R モデルより求めた側方の水平方向の複素剛性の実部 (K_{HS}) を合わせて示してある。バネ定数は、両者共に振動数の増加に伴ない増大し定性的な傾向は一致している。両者の差は加振直角方向の側面の摩擦力を考慮すれば小さくすると思われる。

次に、復元力が1サイクルになす仕事は、減衰力が1サイクル間になす仕事に等しいと仮定し、基礎重心位置の変位に対する復元力 P の位相遅れより次式を用いて減衰定数を算定した。

$$h = \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right) \tan \theta \quad (4)$$

ここに ω_0 : 固有振動数

図-14に上記の減衰定数と複素剛性より求めた減衰定数を示している。複素剛性から求めた減衰定数と若干ピークの相違はあるが、定性的には、ほぼ同様な傾向を示している。ただし、地盤の卓越振動数付近では位相遅れが非常に大きいため、除外している。

4. 結論

軟質地盤上に埋め込まれた基礎の側方埋め戻し効果を起振実験結果に基づいて考察した。これらのことから、以下のことが結論づけられる。

- i) 側方を埋め戻された基礎の挙動は、埋め戻さない場合に比べ、1次の固有振動数が高くなり振幅が著しく減少する。特に全埋めされた基礎では、水平動の減衰が非常に大きくなることがわかった。
- ii) 側方埋め戻し効果を複素剛性で評価すると、水平方向の複素剛性の実部（バネ項）は回転動が卓越する振動数より低振動域では、ほぼ一定値を示し、高振動数域では増加傾向を示す。一方、虚部（減衰項）は回転動が卓越する振動数まで、振動数の増加につれ増加の傾向を示す。
- iii) 振動台基礎側面の動土圧分布から求めたバネ定数、減衰定数は、S-R モデルより算出した側方の水平方向の複素剛性と定性的に一致した。

〈参考文献〉

- 1) 塩見哲他；基礎と地盤の動的相互作用を考慮した変電機器の耐震設計に関する研究報告 電中研総合報告
- 2) 国生剛治他；軟質地盤上の大型基礎の動的挙動に関する実証研究（その4）電中研報告'78.10 '72.7

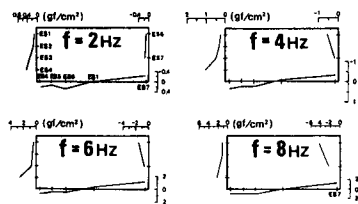


図-12 動土圧分布

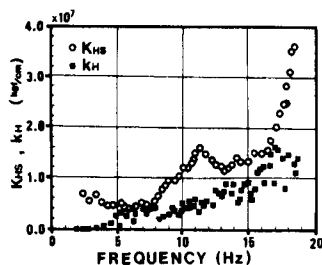


図-13 バネ定数の比較

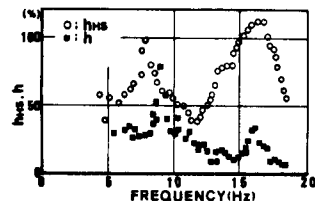


図-14 減衰の比較