

京都大学防災研究所 正会員 柴田 徹
 京都大学 工学部 正会員 O土岐憲三
 清水建設 正会員 山本知義

1. まえがき

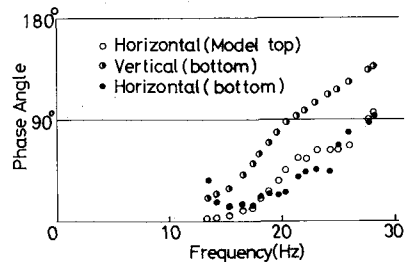
構造物基礎の地震応答解析においては、周辺地盤をも含めた振動系を、ばね-質量によるモデルや有限要素法などのような離散的な振動モデルに置き換える方法や、地盤を半無限弾性体とみなしてこれに弾性波動論を適用して、構造物基礎と地盤との動的相互作用を検討する方法などが用いられている。後者の方法は震動エネルギーの地盤中への透散現象なども解析に取り入れられるが、構造物基礎の形状や振動形態等に関して数理解析上の制約が伴ない、実際の振動系を対象とすると理論解析の適用が困難となる場合が多い。そこで、本研究では地盤内への震動エネルギーの透散現象を構造物基礎に対する強制振動実験から定め、これをばね-質量系の振動解析モデルに導入して地震応答解析を行なう方法について検討したものである。

2. 模型振動実験

地盤と構造物基礎の動的相互作用に関係する力学定数を振動実験から定めるために模型ケーソンを製作し、起振器による振動実験を実施した。模型ケーソンは長さ2000mm、直径1370mmの鋼管と直径711mmで同じ長さの鉛管とをその中心軸が一致するように同心円状に配置し、両鋼管の間にコンクリートを充填したものである。この模型ケーソンをその頂部まで自然地盤中に埋設したが、当該地盤には地表から-2.7mに堅固な砂礫層があり、その上方に粘土層が載っているため、地表から約0.7mの深さまで直径約10mにわたってはぎ取り、模型ケーソン底部が砂礫層上に載るように設置した。振動実験に使用した起振器の最大振動数は30Hz、最大起振力は約1.6tonである。振動測定にはサーボ型加速度計を使用し、模型頂部での水平方向、模型底部での水平および鉛直方向加速度を測定した。この加速度計の固有振動数は450~480Hzであるため、実験で対象とする振動数領域である30Hz程度では加速度自体の位相遅れは無視できる程度に小さく、位相に関する測定結果の信頼度は高いものと考えた。また起振器も起振力の位相検出装置を内蔵していることから、各測定位置での運動の起振力に対する位相遅れの測定が可能である。

3. 実験結果による振動モードの解析

図・1は模型頂部の中央において、水平方向に250kgの加振力で振動をかけた場合の各測定点における振動の起振力に対する位相遅れを示したものである。模型頂部の水平加速度と底部の鉛直加速度には模型の動揺運動の影響が卓越し、底部の水平加速度には並進運動が関係するものと考えられるが、図・1によれば前二者の位相特性はほぼ似ており、後者のみが明らかに異なった位相特性を示している。



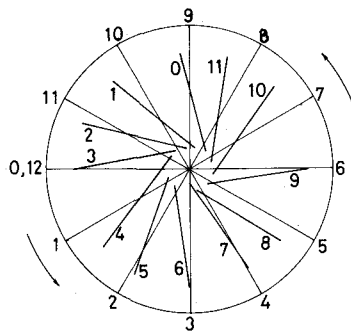
図・1 起振力に対する位相遅れ

また、最大応答加速度振幅は頂部での水平方向が約200gal、底部の水平が約30gal、底部の鉛直方向が約10galである。これらのことから、模型ケーソンは動揺運動と並進運動からなる2自由度の振動系としての運動が卓越していることがわかる。

図・2は起振力に対する模型頂部と底部の位相遅れを明らかにするために、起振力の1周期間を12等分して位相角30°おきにわたる時刻は0~12の番号を付し、一方その時刻における模型頂部と底部の水平加速度の

応答振幅と位相遅れとから位相面上の座標を定め、両座標間を直線で結んで対応する起振力の番号を付したものである。従って、同図中の太実線は同じ番号を起振力に対する模型中心軸の位相面上の位置を表わすことになる。この図から、この加振状態では模型頂部は起振力に対して約80°程度遅れて振動し、模型底部はそれよりさらに遅れて、引きまわられるごとくに運動していることがわかる。換言すれば起振力によって模型はまず動揺運動を行ない、遅れて並進運動をしていることになる。

一方、模型頂部の中央から離れた場所では上下方向に加振した偏心鉛直加振実験における測定結果の1例から、上述の例と同様に1周期間を12等分に分割し、それぞれの時刻における模型中心軸線の振動モードを示したのが図・3である。偏心鉛直加振は模型に回転モーメントを与えるために行ったものであるが、図・3には動揺と鉛直のみならず並進運動も明らかに現れわけており、これは並進運動と動揺運動の間に連成作用のあることを示している。



図・2 起振力に対する位相遅れ (T頂部水平加振, 250kg, 25Hz)

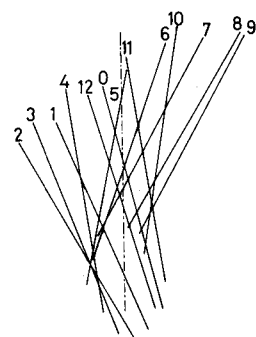
4. 相互作用係数の算出

水平方向に鉛直方向に加振を受けるときにはこの模型ケースは回転、並進、鉛直の3自由度の振動系として取り扱っていくことが明らかであり、その運動方程式は次式で表わされよう。

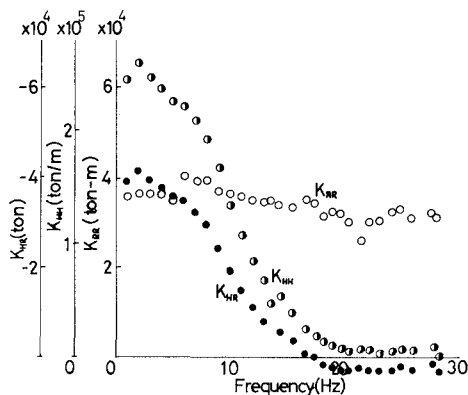
$$\begin{Bmatrix} J & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & m \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\psi} \\ \ddot{u} \\ \ddot{v} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} G_{RR} & G_{RH} & G_{RV} \\ G_{HR} & G_{HH} & G_{HV} \\ G_{VR} & G_{VH} & G_{VV} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \psi \\ u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} M \\ H \\ V \end{Bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 J, m は質量モーメント、質量であり、 G_{rs} は複素剛性、 M, H, V はそれぞれ回転モーメント、水平力、鉛直力を表わしている。この方程式のうち、9つの複素剛性が未知数であるが、そのマトリックスの非対角要素の交換則から未知数は6となる。

いま、模型頂部での水平加振力を F_1 とすれば $M = F_1 H_d, H = F_1, V = 0$ であり、偏心鉛直加振力を F_2 とすれば $M = F_2 H_d, H = 0, V = F_2$ となり、それぞれの加振状態における応答の振幅と位相角を測定すれば、6個の複素剛性を定めることができる。このように考之下に実験結果に基づいて複素剛性を算出し、その実数部であるばね係数 K_{rs} の1例を図示したのが図・4である。 K_{RR} は動揺振動、 K_{HH} は並進運動のばね係数を表わし、 K_{RH} は動揺振動と並進運動の連成作用を表わすばね係数である。このようにして定まる複素剛性はいずれも振動数に依存する特性を示しており、地盤の質量作用や震動エネルギーの消散現象をも包含した力学的効果であると考之よ。



図・3 偏心鉛直加振時の振動モード図 (500kg加振, 25Hz)



図・4 実験結果に基づくばね係数の例 (250kg加振時の場合)

5. 地震応答解析

対象とする系の複素剛性が振動数に依存する2自由度の振動系の地震応答解析を行ない、有限フーリエ変換の手法により地震波形に対する応答計算を実施し、これを応答スペクトルに表示したが、その詳細は講演時に譲る。