

1. はじめに

地盤と構造物の動的相互作用を解析するには、構造物と地盤の間のエネルギーの伝達を含んだ方法によらなければならない。そのエネルギーが相互作用を通して消費される過程が減衰機構であると考えられることができる。減衰には内部減衰と逸散減衰とが考えられ実際の減衰機構は両者の複合されたものであろう。そこで、エネルギーに着目して逸散減衰の性状を理解するため、簡単なモデルを考えて有限要素法によって解析したのでその結果について報告する。

2. 解析モデル

図1に示す様に剛な基盤上の単層の地盤があり、地表には半径 R_0 の質量のない円板が密着している。この円板に振動を与えることにより系にエネルギー E_{in} が入力される。一方 R の位置に円筒面を考え、この面より外部にエネルギー E_{out} が掃き出される。 R 面においてエネルギー伝達境界を設定し、この内部を有限要素分割した。軸対称構造の軸対称荷重条件の解析を行ない、結果は、層厚 H 、セン断波速度 V_s に従った無次元振動数 f_0 (角振動数 $a_0 = \omega R_0 / V_s = 2\pi f_0$)と無次元化量で示した。地盤の弾性定数を複素数で与えて、履歴型の内部減衰 β とした。ここに示す解析結果は層厚 H を円板半径の倍とし、内部減衰は0%, 5%, 10%, ポアソン比0.3とし、振動数は地盤のセン断3次共振振動数手前までを対象とした。

3. 入力エネルギー

円板の変位と外力の関係から定まる動的な剛性を K_S とする。

$$K_S = K_0 (k_1 + i a_0 C_1) (1 + 2i\beta) \quad (1)$$

K_0 は静的な剛性を示す。 k_1 , C_1 はそれぞれ剛性関数、減衰関数と呼び、無次元量で無次元振動数 a_0 又は f_0 の関数である。図2に k_1 , 図3に C_1 を示す。SI, PI等はモデルにおけるS波, P波による地盤の共振振動数を示す。カッコで示した(SI)等は連続体の場合の共振点であり、離散化により若干共振点が高い方にずれる。共振点のたびに k_1 , C_1 が大きく変化するが、内部減衰 β を与えることにより平滑化の傾向が認められる。 C_1 は1次のS波による共振点以下では非常に小さい値を持つ。特に内部減衰を与えない場合は C_1 は値を持たない。内部減衰は地盤共振点付近においての有効性が大である。ところで、円板に質量を付加した場合、相互作用系の無次元固有振動数を a_{or} とすると減衰定数 h は(1)式を用いて(2)式となる。

$$h = I_m(K_S) / 2 \operatorname{Re}(K_S) = (a_0 C_1 + 2\beta k_1) / 2(k_1 - 2a_0 C_1 \beta) \div a_{or} \cdot C_1 / 2k_1 + \beta \quad (2)$$

減衰関数 C_1 と内部減衰 β は図3に見るように独立ではないが、減衰定数 h は内部減衰に減衰関数の関与する項を加えて近似される。系の固有振動数 a_{or} が地盤1次共振点を越えるならば第1項が優越した大きな減衰定数が期待される。図4は円板から地盤に入力するエネルギー E_{in} を無次元表示した。 E_{in} は(1)式によると

$$E_{in} / (\omega / 2 \cdot K_0 U_0^2) = 2k_1 \beta + a_0 C_1 = I_m(K_S) \quad (3)$$

と表わすことができる。ここに U_0 は円板の変位、 ω は角振動数、そして I_m は虚数部を示す。 E_{in} は単位時間当りのエネルギーとして求めた。基準値として同じ変位量の静的バネに貯えられるエネルギーを選んだもので、この時無次元入力エネルギーは動的剛性の虚数部に一致する。また内部減衰を与えない場合、(2)式から明らかなように図4の入力エネルギー E_{in} は図3の減衰関数に無次元振動数を乗じたものと一致する。図4によれば地盤の共振点付近では常に内部減衰 β が大きい程入力エネルギーを要している。しかし共振点以外では、内部減衰 β が増加することによる入力エネルギーの増加はそれ程大きいものではない。S波1次共振点以下では入力エネルギーはきわめて小さくほぼ β に比例している。従って内部減衰は地盤共振点におい

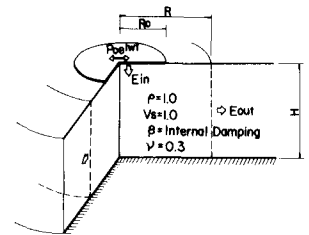


図1 解析モデル

て重用な働きを示すと考えられる。一方入力エネルギーは地盤共振点を越えるたびに大きく増加しているが、これは地盤の側にそれだけのエネルギーを消化する用意ができていていることを示している。

4. 逸散エネルギー

円板より入力されたエネルギーは、内部減衰によってエネルギーを消費しつつ外方へ逸散する。Rにおける円筒仮想面全周より掃き出される単位時間当りのエネルギー E_{out} を算定した。 E_{out} は考えているモデルに対して振動数と内部減衰に大きく依存する。図4に示す入力エネルギー E_{in} に対する出力エネルギー E_{out} の比として図5および図6に示した。図5の内部減衰のない時には E_{out}/E_{in} は常に1である。但し1次共振点以下と各共振点では E_{in} の値が0又は微小なために求めることができない。地盤には1次共振点より上では波動が存在するので図5の上部に波動モードとして示した。RはRayleigh波、LはLove波を意味し、添数字はモード番号を示す。地盤の共振点をへるたびに地盤に新しく波動が形成される。これらの波動が運搬するエネルギーの割合が図6に示してある。太線がRayleigh波Love波のエネルギー分担境界を示し、細線はモードごとの分担を示した。新しいモードの波動が加わると運搬するエネルギーが増加するので、 E_{in} が多く要求され C_1 も大きい値をとる。これが逸散減衰機構であろう。

Love波の分担するエネルギーが大きい。地盤に形成される波動の構成は加振形式によって異なると考えられるが、図1の水平加振型モデルはLove波が形成されやすいことによるものであろう。

内部減衰を与えるとRの位置によって E_{out}/E_{in} に差を生ずる。図6は $R=2R_0$ より外部に伝達されるエネルギーをRayleigh波とLove波の分担に分けて示したもので、入力エネルギーに満たない分はR以内の領域で内部減衰と波動伝搬過程において消費されたエネルギーと考えることができる。図7に伝搬エネルギーの密度分布を示した。内部減衰による分布形状に大きな変化はなく伝搬過程におけるエネルギー消費が大きいと理解される。

5. まとめ

地盤-構造物系動的相互作用における減衰機構をエネルギー伝搬としてとらえて検討した。その結果、1.逸散波動の運搬するエネルギーが逸散減衰であり、その波動モードによる分担を示した。2.逸散エネルギーの地盤内密度分布を示した。3.地盤の共振点付近では内部減衰の働きが重要である、等を理解することが出来た。

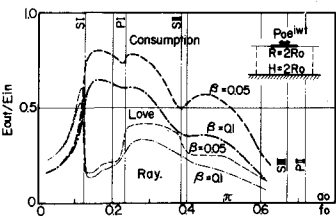


図6 逸散エネルギー

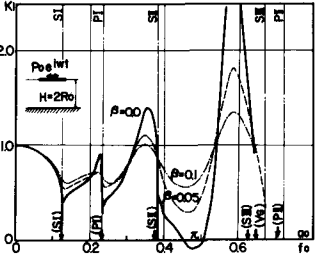


図2 剛性関数

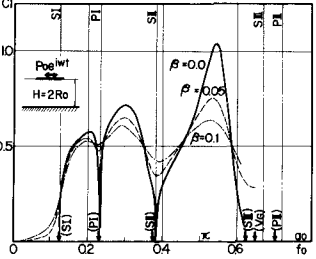


図3 減衰関数

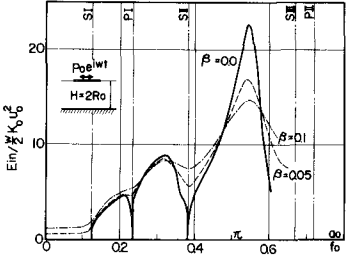


図4 入力エネルギー

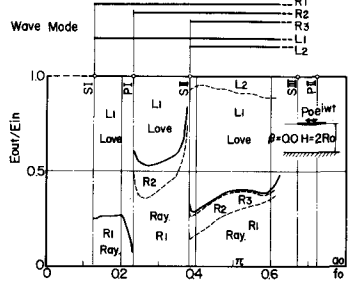


図5 モード逸散エネルギー

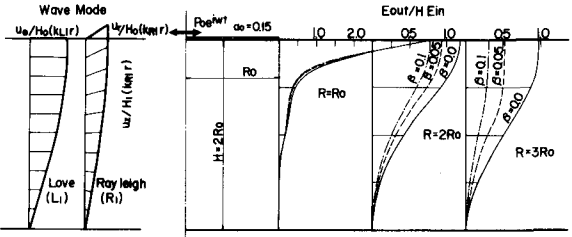


図7 エネルギー密度