走行荷重による成層地盤の振動解析に関する一検討

神戸大学工学部　正　員　　北村　泰寿
神戸大学大学院　学生員　○松尾　幸治

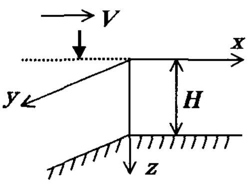
1 はじめに

半無限弾性体表面の走行問題に対する理論解[1)]を示したが、この解を成層地盤に拡張することは難しい。本研究は、走行車両による成層地盤の振動解析法として、薄層要素－離散化波数法を利用した数値解析法を展開し、諸パラメータが本解析法による地盤応答に及ぼす影響を検討したものである。

2 定式の概要

解析モデルとして、図－1に示すような剛基盤上の弾性体（深さH）を考え、x,y平面を地表面、車両の走行方向をx軸とする。図－2に示す定式のフローチャートに従って、定式の概要を説明する。

いま、時間tおよびy軸に関してフーリエ変換、x軸に関しては有限区間$|x| \le L/2$に対する離散化波数法を導入する。このとき、変位は次式のようにフーリエ級数表示できる。



図－1 解析モデル

$$u(x,y,z,t)=\frac{1}{L}\sum_{n=-\infty}^{\infty}\left[\frac{1}{(2\pi)^2}\iint_{-\infty}^{\infty}\tilde{\bar{u}}_n\left(k_{xn},k_y,z,\omega\right)e^{-i(\omega t+k_y y)}d\omega\,dk_y\right]e^{-ik_{xn}x} \tag{1}$$

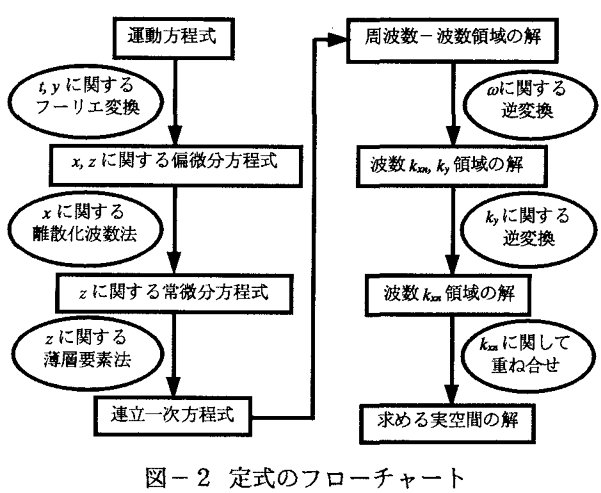
ここに、$\boldsymbol{u}$は変位ベクトル、k_{xn}は離散化波数で、$\sim$は波数領域、$\overline{\ }$は周波数領域を表す。また、上述の変形によって運動方程式はzに関する常微分方程式となっている。そこで、図－1に示す剛基盤上の弾性体を有限個の薄層に分割し、薄層内の変位関数を仮定して、周波数－波数領域の運動方程式にガラーキン法を適用する。この操作によって薄層に対する剛性方程式が導かれるので、最下端の境界条件を考慮して重ね合わせれば、次式の全体剛性方程式が得られる。

$$\left[k_y{}^2\boldsymbol{A}+k_y\left(k_{xn}\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C}\right)+k_{xn}^2\boldsymbol{D}+k_{xn}\boldsymbol{E}+\boldsymbol{F}-\omega^2\boldsymbol{M}\right]\tilde{\bar{\boldsymbol{U}}}=\tilde{\bar{\boldsymbol{P}}} \tag{2}$$

ここに、$\tilde{\bar{\boldsymbol{U}}}$, $\tilde{\bar{\boldsymbol{P}}}$は周波数－波数領域における各薄層境界の変位・外力ベクトル、$\boldsymbol{A}\sim\boldsymbol{F},\boldsymbol{M}$は地盤の材料定数に関わる正方マトリックス（詳細は省略）である。このとき、式(1)の$\tilde{\bar{\boldsymbol{u}}}_n$は各薄層境界の変位ベクトル$\tilde{\bar{\boldsymbol{U}}}$で表されている。また、荷重$\tilde{\bar{\boldsymbol{P}}}$は鉛直荷重$P_z e^{ipt}$が一定速度$V$で$x$軸上を移動する場合、次式で表される。

$$\tilde{\bar{\boldsymbol{P}}}=2\pi P_z\delta\left(\omega-p-k_{xn}V\right) \tag{3}$$

いま、式(2)の波数k_{xn}は離散化波数として与えられていることに留意して、$\tilde{\bar{\boldsymbol{U}}}$を周波数に関して逆変換すれば、式(2)は$\omega=p+k_{xn}V$のときのみ意味を持つ。これより、波数領域の$\tilde{\boldsymbol{U}}$に関する連立一次方程式を得るが、この式は波数$k_y$を未知量として含む式となっているため、$k_y$に関する固有値問題を利用して$\tilde{\boldsymbol{U}}$を求める。最終的に$\tilde{\boldsymbol{U}}$は$k_y$に関して特異点を有する無限積分で表されるが、複素周回積分を利用して変位$\boldsymbol{U}$を解析的に求めることができる。



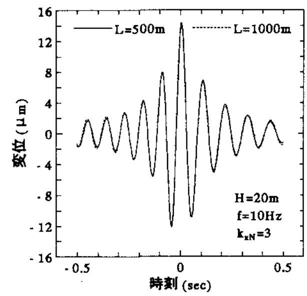
図－2 定式のフローチャート

Yasutoshi KITAMURA , Koji MATSUO

3 計算結果とその考察

図－1に示す解析モデルにおいて、荷重の走行速度を*60* km / hr 、地盤のせん断波速度を*200* m / s 、密度を*1.8* t / m^3 、ポアソン比を*1 / 3* 、荷重の大きさを$P_z = 9.8$ kN 、観測点を（*0, 1* m）とする。

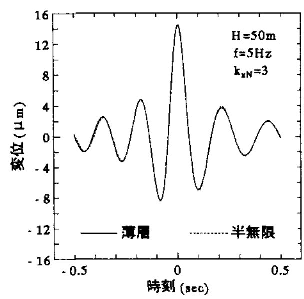
薄層要素－離散化波数法による数値解析では、要素厚(Δh)、波数の個数(N)、有限区間長(L)あるいは最大波数($k_{xN} = 2\pi N/L$)をいかなる値に設定するかが問題となる。図－3は、表層厚を$H = 20$m 、加振振動数を$f = 10$Hz とし、$\Delta h = 1$m 、$k_{xN} = 3$ のもとで、L の影響を調べたものである。同図より、L による差異はほとんど見られない。ここには図示していないが、$L = 500$m のもとで、$k_{xN} = 2$ と $k_{xN} = 3$ の比較から、最大波数の影響もほとんど生じていない。これより、以下の計算結果では、$k_{xN} = 3$ 、$L = 500$m （$N = 240$）とした。



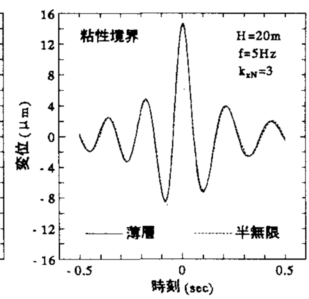
図－3 有限区間長の影響

図－4は、$H = 50$m 、$f = 5$Hz として、半無限弾性体に対する結果[1]と比較したものである。表層厚が*50*m 程度であれば$t = 0$sec 近傍（荷重が測点に最接近した状態）での応答は半無限弾性体の応答と差が見られない。しかし、半無限地盤を模擬するために表層厚を大きく取ることは薄層要素数を多くすることになり、演算時間の増大につながる。そこで、$H = 20$m として、剛基盤面に粘性境界を導入した結果と半無限弾性体の結果を比較したものが図－5である。若干の差異は見られるが、粘性境界は有効であることが分かる。

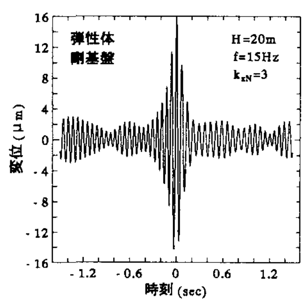
ところで、剛基盤上の表層は固有振動数を有することが知られている。図－6は、$f = 15$Hz のときの応答波形を示したものであるが、$t = 0$sec から離れるとともに、うなりに似た現象が見られる。薄層分割数、離散化波数、有限区間長に対する種々の検討にも関わらず十分な解明と解決策が見当たらない。そこで、図－7に粘性境界を導入した場合、図－8に剛基盤上の粘弾性体とした場合、図－9に粘弾性体－粘性境界の組み合せにした場合の結果を示す。なお、粘弾性体は、振動数*10*Hz で減衰定数を*0.02* とするような粘弾性係数を考えたものである。図－7～9の間には、$t = 0$sec 近傍での応答にほとんど差がなく、図－9では荷重の作用点が$t = 0$sec から前後に遠ざかるとともに、応答波形は滑らかに減少している。他の振動数に対する結果も踏まえて、地盤のモデル化として、粘弾性体－粘性境界の組み合せが最も有効ではないかと考える。



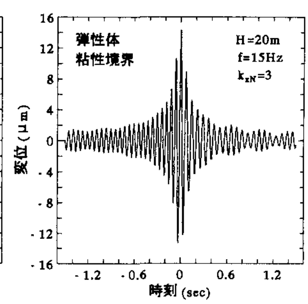
図－4 半無限との比較



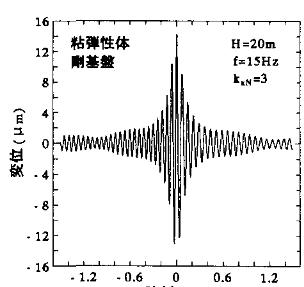
図－5 半無限との比較



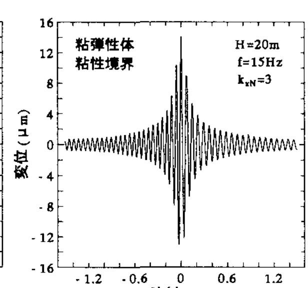
図－6 モデル化1



図－7 モデル化2



図－8 モデル化3



図－9 モデル化4

[文献] 1)北村・武居：道路交通車両による地盤振動解析に関する一手法，土木学会関西支部年講，1998.