

土質柱状図ファイルによる地盤振動シミュレーション

幾 志 新 吉*

1. ま え が き

1.1 経 緯

国立防災科学技術センターでは科学技術庁資源調査会の勧告第2号(昭和32年)「都市域地盤測定計画推進に関する勧告」に沿って、昭和44年から「電算機による都市地盤土質柱状図資料の蓄積・検索・解析法に関する研究」を行なってきた^{1)~4)}。そのひとつの方向はリファレンス・センターを想定した蓄積・検索法の開発であり、一方は土質断面図、 N 値等深線図、液状化地点分布図の自動作製など、解析・利用法の開発である。本稿では後者の一例について述べる。なお用いた柱状図ファイルには川崎地区の3,000本のボーリング柱状図が収録されており、ボーリング地点は経度 4.5'', 緯度 3.0'' (1辺約100m)のメッシュで表わされる。

1.2 概 要

柱状図記載の N 値から S 波速度 V_s を推定し、速度層および地震基盤を自動的に設定することができれば、重複反射法による鉛直1次元の振動計算を、平面的に分布する大量のボーリング地点に施す場合に便利である。

この方法により、基盤への推定地震動に対する地表の最大加速度分布図などを示すことができ、さらに柱状図のないメッシュを補間し等値線(contour)を描かせることにより、「等震線図」を作製することができる。

本稿では、筑波の国立防災センター構内における、速度層の実測値を含む柱状図と自然地震観測記録を用いて上述の N 値による方法を検討し、つぎに柱状図ファイル地区について想定地震動に対する振動シミュレーションを行なった。

また同ファイルについて、 N 値から設定した地盤構造の、静的および動的特性を表わす平面分布図を計算し、たとえば最大増幅度を与える周波数と表層の固有周波数との間に強い関連のあることが認められた。

また値が散在するメッシュ平面上における補間法および等値線の追跡法について、一般的な検討をした。

2. N 値による V_s 層の自動設定

2.1 層 の 区 分

N 値から V_s を推定するいくつかの試みがなされ、その推定は N 値だけではなく土質・深度・年代などの指標を加味したほうがより実測に合うという報告もあるが⁵⁾⁶⁾、ここでは N 値のみを用いるつぎの実験式によった⁷⁾。

$$V_s = 76N^{0.39} \dots\dots\dots(1)$$

層の区分⁸⁾は V_s に変換する前に N 値に関して行ない、その区間の平均 N 値から V_s を計算し、その層の S 波速度とした。層の区分を N 値に対して行なった理由は、柱状図資料による地盤の硬軟などの特性の判断や、 N 値等深線との関連づけが容易なこと、実験式(N 値のみによる)を変えても V_s が変わるだけで層区分は不変なことである。

層の区分法はつぎのとおりである。孔口から孔底までの N 値を深度順に $N_1, N_2, \dots$ とする。ある層の上限の深度における N 値を N_i とし、さらに下の深度における N 値を N_j とするとき、

$$N_{\max} - N_{\min} > A\sqrt{N_i} \dots\dots\dots(2)$$

$N_{\max} = \text{Max}\{N_i, \dots, N_j\}$, $N_{\min} = \text{Min}\{N_i, \dots, N_j\}$ なる最初の N_j を与える深度までを1つの層とみなし、続いて $A\sqrt{N_j}$ を幅として下の N 値をまとめていく。 A は N 値のバラッキの許容度を表わす係数である。 A を大きくとれば層数は減り、小さくとれば増える。実際には3~10層程度になるように定めた。

第1層については、建築物の基礎の指標としてよく用いられる値(たとえば $N_s = 30$)までが表層となるように、次式の定数 N_0 を定めた。

$$A\sqrt{N_0} = N_s \dots\dots\dots(3)$$

この方法を表現しなおすとつぎのようになる。ある深度における N 値に対してバラッキの許容度を表わす幅を与え、その深度より下の N 値曲線がその幅からはみ出すところまでを1つの層としてまとめる。続いて下方の N 値に対して幅を定め同じことを繰り返す。この操作を孔口から孔底に至るまでの N 値について行なうと、折れ線状の N 値曲線から階段状の層が設定され、各層の平均 N 値に対応する V_s が得られる。

幅の定め方は N 値が大きいほど広くなるようにする。すなわち N 値が小さいところでは小さな変動も考慮し、 N 値が大きいところでは小さな変動は無視するのである。このことは実験式(1)における N 値と V_s の変動量の関係からも妥当といえるであろう。(2)式の $\sqrt{N}$ はその条件をほぼ満た

* 国立防災科学技術センター情報処理研究室 室長

しかつ計算に便利な関数である。

層の区分法として、 N 値曲線を移動平均法により平滑化し変曲点をもって区分する方法が考えられたが、つぎの理由で採用しなかった。i) N 値がわずかしき測定されておらず、しかも測定間隔が一定していないボーリングがかなりある。一方ボーリングの存在するメッシュはなるべく減らさないほうが良い。ii) 砂レキ層の近辺など N 値の変動のはげしい部分の平滑化は平均の幅を大きくしても困難である。iii) 平均の幅を大きくすると上端、下端で大幅な外そうが必要となる。iv) 平均の幅の与え方に依然として人為的要素がはいる。

2.2 地震基盤の設定

2.1 で定めた速度層の、どこを地震基盤とみなしたらよいかという問題が残る。理想的には地盤中のある層に着目したとき、その層の上層との境界面より入射した下降波が下層との境界において反射し、再び上層との境界に達するまでの時間が十分大である場合に、その上層との境界面より下を地震基盤とすればよい。しかし実際にはこのような明りょうな基盤の定義ができない場合が多い。

そこで基盤の定義を少しゆるめて、その層から下では弾性的性質の差異の少ない、いいかえれば V_s の差の少ない層の最上層をとればよい。一般に多層からなる地層モデルにおいて、下部数層の V_s を近い値にとって振動計算を行なった結果を見ると、下部数層の波形が非常によく似ていることがわかる。このことから V_s の差の少ない下部数層については、その最上層のみがあれば十分で、それ以下の層に関する計算は無意味となる。したがって地震の振動解析を目的とする場合には、 V_s の差による基盤の定義が実用上妥当であることになる⁹⁾¹⁰⁾。

しかしながら数10mのボーリングでは、 N 値から設定する場合はもとより、実測の V_s についても変化がはげしく、それより下層で V_s の差が少なくなるという深度を定めることすら困難である。そこで基盤の定義をさらにゆるめて、 V_s が与えられた一定値（基盤の仮定速度）を越える層を便宜上基盤とみなすことに

する。この層が土丹層でない場合、都市地盤一般にそれ以下で速度が逆転していて波形が変化しにくいこと、増幅度が表層と基盤の速度比に対応するという説明があること、また2.3で述べる振動計算例からしても、この基盤の定め方は不自然ではなかろう。

2.3 計算例

当所筑波構内における柱状図と自然地震観測記録を使用する。柱状図の $A\sqrt{N}$ 欄が N 値曲線から区分、計算した速度層である。特に $A\sqrt{N_0}=N_s$ が1, 2層を区分する、すなわち表層をきめる N 値である。なお速度検層は専門技術者により実施され、 V_s の測定は板たたき法により、深さ1mごとに行なわれた。

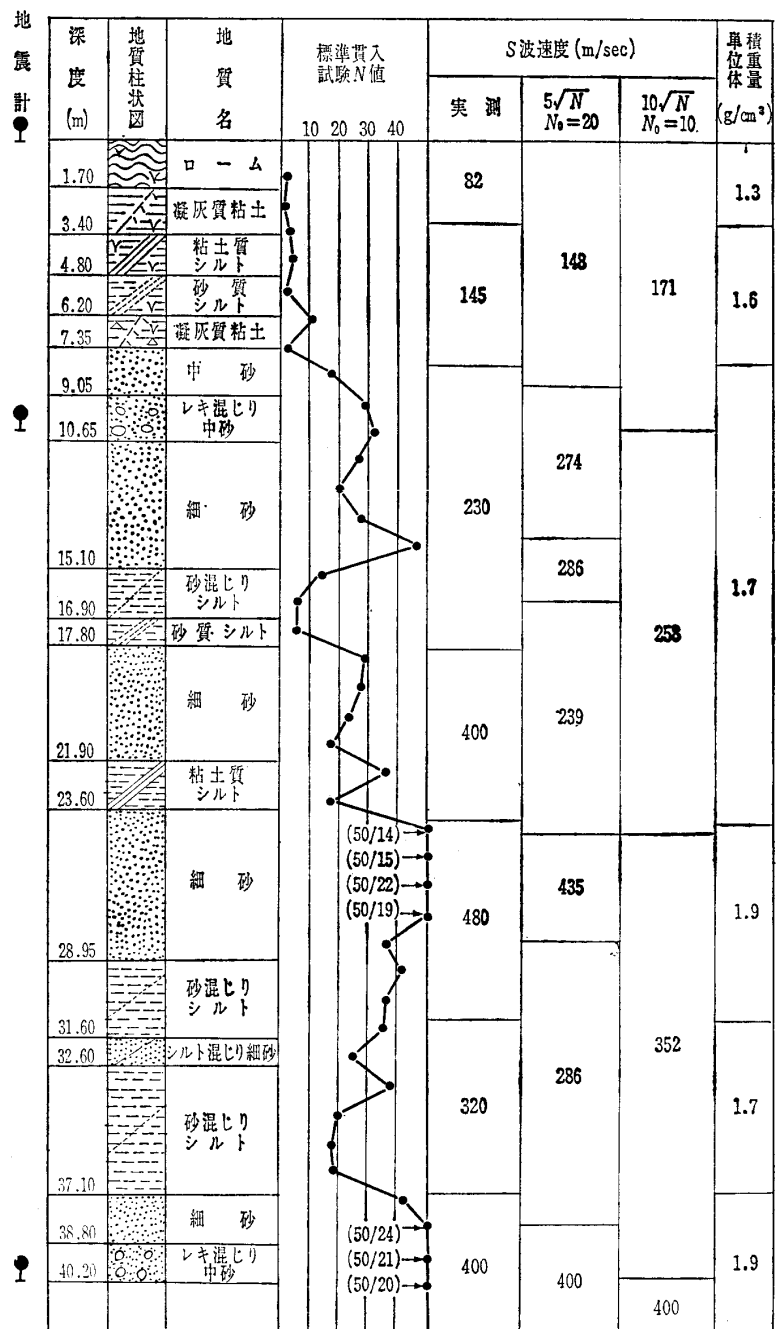


図-1 筑波構内柱状図と速度層

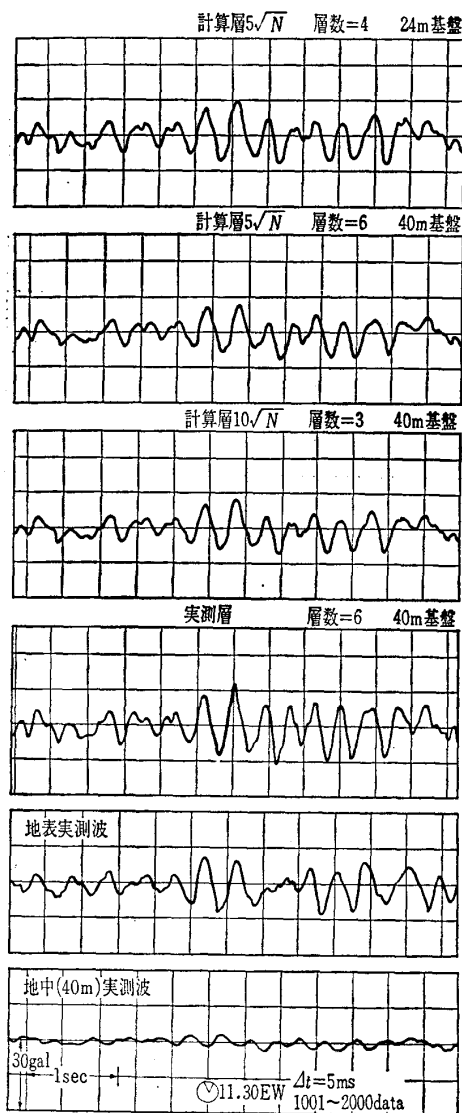


図-2 推定波と実測波(筑波)
(1974. 11. 30EW, 鳥島深さ420Km距離700Km, M7.6)

この図から、実測層との対応を考えると、 $5\sqrt{N}$ の計算層は区分が密に過ぎ、 $10\sqrt{N}$ では粗ら過ぎるということができる。

つぎに実測波と推定波の対応という観点から粗な区分と密な区分が、どのくらい異なるかを見よう。図-2に各計算層の地表推定波と実測波を対比させて示す。地表推定波は、地中40mの地震計に記録された地震波のS波部分を入射波として計算した。

推定波はいずれの層区分についても、振幅・波形、スペクトル(図省略)とも実測波とよく一致しているが、特に粗な区分である $10\sqrt{N}$ 層の場合が実測波に最も近く、実測層の場合のほうが振幅が大きくなり過ぎてかえって合わない。

つぎに $5\sqrt{N}$ 計算層の基盤を深さ24mの第5層まで上げて計算してみると、40m基盤の場合とほぼ同じ波形が得られる。このことは2つの基盤速度がほぼ同じで、したがって増幅度が接近していること、第5層以下の V_s には大きな差があるが、5、6層が速度の逆転層でこの2層が一体

となって振動していて波形が変化しにくく、各層の波形(図省略)を見ても5層以下で振幅・波形とも大きく変化していないことから説明できる。これは所定の基盤速度に達する層が途中にあれば、そこを基盤とみなしても大過ないことを示しているといえよう。

ここで4つの推定波間の振幅の多少の相違が、いずれも基盤と地表の速度比に対応していることを指摘しておこう。

ところで振動シミュレーションの目的からすれば、 N 値による計算層と実測層が合わなくても、推定波と実測波が合っていればよいのではあるまいか。

なお計算例では震源が遠く 15 Hz 以上の高周波成分を含まない地震波について述べたが、震源が近くそれを含んだ地震波についても計算した。その結果実測波のスペクトルに現われている 25 Hz 以上の小さなピークが、各推定波のスペクトルに欠けていることを除いて、2つの地震波について全く同じことがいえる。

また軟弱地盤の例として茨城県長豊橋の記録について、同様の計算を行ない同様の結果を得た。以上の考察から、 N 値を用いて自動的に速度層を設定し、所定の速度をもつ層を基盤として重複反射法による振動計算を行なう方法が、かなり実用的であることがわかった。

2.4 柱状図ファイルへの適用

ファイルに収録された川崎地区 3,000 本のボーリング柱状図データについて、上述の方法により速度層を設定した。その際、同一メッシュに2本以上のボーリングがある場合には、メッシュを代表するボーリングとして最深のもの1本を採った。その理由は機械的処理が容易で、一方深いものほど一般に信頼性が高く、 N 値測定点も豊富で、また実際の基盤により近づくと考えられるからである。この結果計算の対象となるメッシュ数、すなわちボーリング数は 1,750 個となった。

さて層の区分を密にして層数を増しても、必ずしも計算結果が実際に近づくとはいえないので、まず粗な区分法を用いた。

層の区分を表わす式(2)の右辺 $A\sqrt{N}$ のパラメーターは $A=10$, $N_0=10$ とした。1、2層を区分する相当 N 値は $N_s=10\sqrt{10}\div 30$ となる。基盤は土丹層相当とし、速度は 600m/s と仮定した。基盤深度の定め方はつぎのとおりである。孔口から孔底へ N 値曲線を区分していくとき、

- i) 速度が基盤速度を越えればそこを基盤とする。
- ii) 孔底に至っても基盤速度が得られなければ孔底をもって基盤とする。
- iii) ただし ii) の場合で、孔底が与えられた一定深度に至らなければ、孔底を延長して基盤とする。その深度は川崎地区の場合、台地で30m、低地で40mとした。なお台地で15m、低地で25m以下の浅いボーリングしか存在しないメッシュは捨てた。

この方法によると基盤深度はメッシュごとに独自の値を

もつことになる。別法として1メッシュよりも広域にわたって基盤深度を一律に与えることも考えられるが、ここではメッシュ・データを優先した。実際このようにして定めた基盤深度が近くのメッシュ間でさほどばらついていないことが確かめられる。

以上の方法により設定された、各メッシュの地盤モデルの諸特性を示す平面分布図として、“基盤深度分布図”、“地層数分布図”、“表層厚分布図”などがある。以後“”でくくった分布図は本稿には図示しないものとする。いずれも様式は3.の図-3、4と同じである。

ところで波動方程式に基礎をおく地盤の振動計算には、 V_s のほかに波動の媒体である地層の密度を与えなければならないが、密度の記載のない柱状図が多く、採取資料も少ない。またパラメーターを減らして複雑さを避け、本質を捉えることがシミュレーションのひとつの考え方であり、密度が一般に速度に比しバラツキの小さいものであることから、ここでは一定値とした。また粘性についても考慮していない。

3. 柱状図ファイル地区の地盤振動特性

2.の方法によって、柱状図ファイル内の1,750メッシュに対して速度層が設定され、基盤入力波が与えられれば、地表の推定波が計算される準備ができた。ここで実際の地震動を入力する前に、重複反射法を前提とした基本的な地盤振動特性を調べておく。

まず4分の1波長則によれば、層厚を層速度で除した値の4倍が層の固有周期である。“表層固有周期分布図”と、“表層厚分布図”を比較すると両者がよく似ていることがわかる。なお以後の動的な振動特性に関する議論には、周期ではなく周波数を用いることにする。

つぎに図-3、4は、入力周波数を0.1Hzから0.1Hz刻みで10Hzまで変えた場合の最大増幅度およびそれを

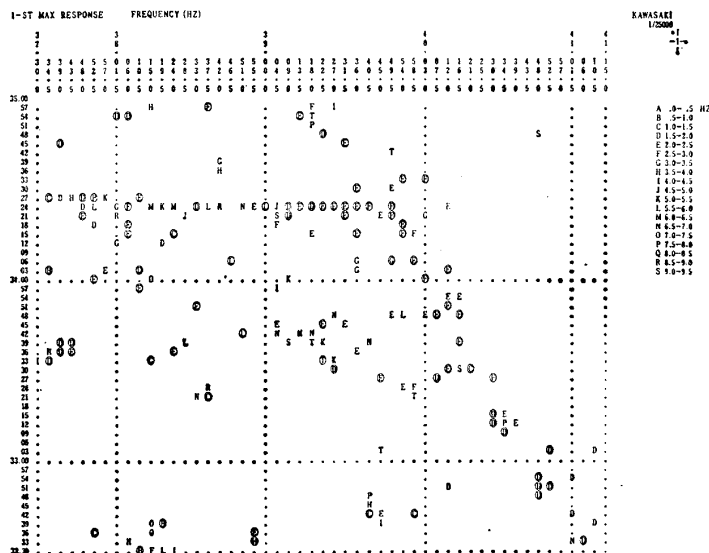


図-4 最大増幅度を与える周波数分布図 ○：表層固有周波数

与える周波数を示す分布図である¹¹⁾。縦横の目盛はメッシュの緯度・経度を示し、メッシュ値は階級文字で表わされている。また図の領域は1:25,000地形図「川崎」の左上4半分に相当する。

図-4の○を付した値は、この階級分類において、“表層固有周波数分布図”における値と一致したものである。文字が一致しないメッシュについても1階級のずれを認めればさらに一致し、表層固有周波数と最大増幅度を与える周波数との間に強い相関があるということが出来る。このことは地表の振幅の大小を論ずる場合、少なくとも重複反射法による振動計算では、基盤入力波と表層との共振を主として考えればよいことを意味する。

なお1、2層が速度の逆転層になっている場合には、両者を合体したものが表層として振動するものと考えられ、その固有周波数は各層の伝ば時間の和の4倍の逆数として計算した。図の領域でこれに該当するメッシュは約10個である。

また表層固有周波数が最大増幅度を与える周波数とは一致しないが、2番目に大きな増幅度を与える周波数と一致するメッシュも何個がある。

さて図-4と“速度比分布図”から、増幅度と速度比を両軸にとった度数分布表を作ると、両者に強い直線関係が認められた。

最後に、より広域の振動特性を見るため、図-4(台地)と同じものを1:25,000「川崎」の右下4半分(低地)について出力してみると、台地と低地の周波数特性が2Hzを境として概略2分されることがわかる。

4. 想定地震動に対する振動シミュレーション

Taft 1952 NSの強震記録を当地の基盤波にもとし、自動的に設定された速度層と基盤をもつ、川崎地区の各メッシュへ入力して重複反射計算を行ない、地表の最大加速度

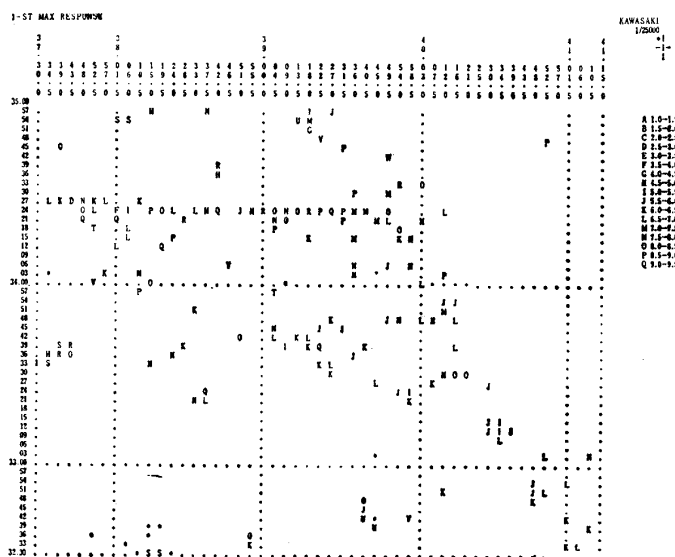


図-3 最大増幅度分布図

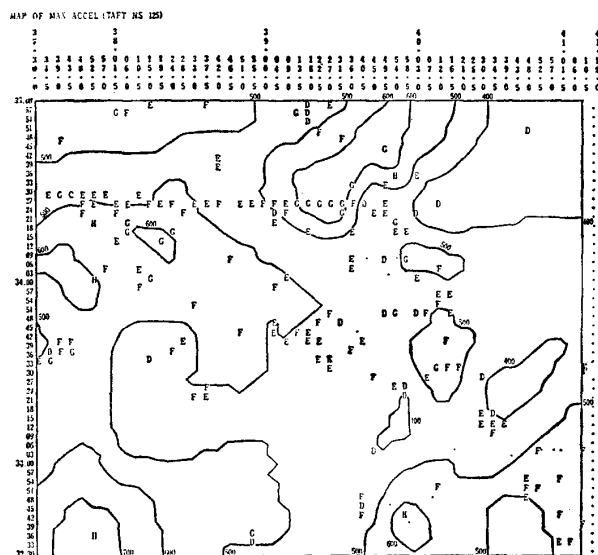


図-5 最大加速度分布・等値線図

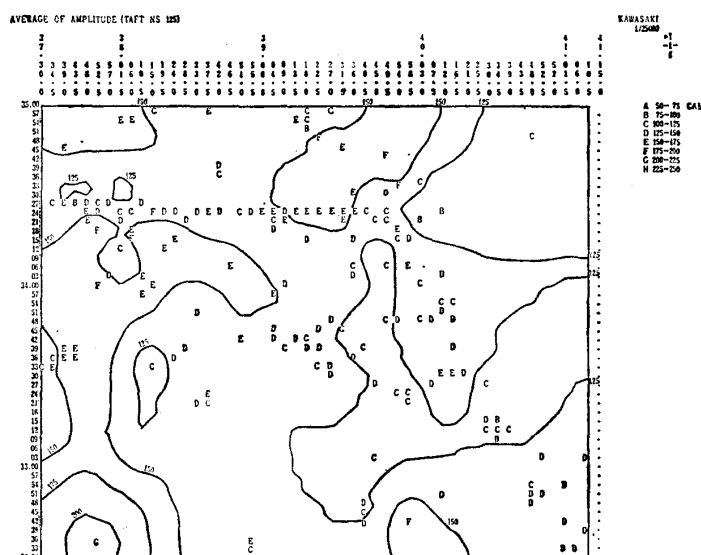


図-6 振幅2乗平均値分布・等値線図

分布および振幅2乗平均値分布を求め、さらに5.に述べる方法で補間・平滑化して等値線を描いた。

基盤入射波の最大振幅は、地表における加速度が関東地震と同等(650 gal)となるように定め125 galとした。またTaft基盤波の卓越周波数は1~2 Hzである。

なお、ここまでは層の区分は固定し粗な区分($10\sqrt{N}$, $N_0=10$ で約3~5層)の場合について述べてきたが、ここでは粗な区分と密な区分($5\sqrt{N}$, $N_0=20$ で約6~8層)について、それぞれ振動計算を行ない結果を平均した。

2つの区分法で特に表層の周波数特性に大きな違いが生じ、かつその一方が入力波に共振した場合、結果が大きく異なることが懸念されたからである。

結果はほとんどのメッシュで、2つの区分法による大きな違いがなかった。

4.1 最大加速度分布

図-5は粗な区分と密な区分による速度層に対して計算した最大加速度を、両者につき平均した値の分布および等値線図である。図中の文字は平滑化する前の値で、補間・平滑化によって描かれた等値線値と合致しないところもある。またラインプリンタで印字した分布図をプロッタに移したため、活字と等値線の間に多少ずれがある。

ところで図-4, 5を比較すると、大きな加速度を示すほとんどのメッシュについて、その最大増幅度を与える周波数が1~2 Hzで、これが基盤波の卓越周波数に一致していることがわかる。

4.2 振幅2乗平均値分布

地震動による建築物の被害という震害分布の観点からは、単に地動を表わす瞬間的な最大加速度よりも、大きな振幅の継続時間、いわばエネルギーを考えたほうが適当であると思われる。これは波形に対して何らかの平均化を行なうことで、具体的には大きなピークをいくつか平均する方法、包絡線の面積で表現する方法などが考えられるが、ここで

はさらに平均化して全波形の振幅の2乗平均を用いた。

図-6は、粗な区分、密な区分の層に対して計算された波形の主動部分15秒間について、振幅の2乗の時間平均値を計算して粗密層区分の平均をとり、加速度の次元で図示するため平方根を求めたものである。

これを図-5と比べると、等値線の概形はよく似ているが、値がより平均化されているため等値線が滑らかになり、長く連続していることがわかる。

5. 平面分布図の補間法と等値線¹²⁾

5.1 補間法

2次元メッシュのいくつかの格子点に値があり他にない場合、補間によって全格子点に値を与える方法としては、地質的方向性の有無など、対象とする現象の特性を考慮すれば複雑な方法が要求されるが、一般的にはいくつかの数値的方法が考えられる。

ここでは補間したい点に近い実測点を近い順に m 点選び、距離に関する重みつき平均をもって補間する方法を用いる。試行結果によると、 m を増すと範囲が広がり、平均化はなされる一方遠い点の値が影響して、補間値は分布図上ではらつく傾向がある。

また距離の逆数をもって各点に比例配分した重みつき平均と、距離の2乗の逆数に関し同様に定めた重みつき平均では、前者について、 m を増した場合と同様な傾向がみられる。

そこで実際の計算では4近点を用い、距離の2乗の逆数に関する重みつき平均をもって補間値とした。

これで全格子点に値が与えられたわけであるが、このままで等値線を描くとギザギザになるので、実測点も含めた全格子点について平滑化を行なった。それは近傍8点を含む正方形内の9点につき単純平均をとるものである。この操作により精度は落ちるが等値線は滑らかになる。

5.2 等 値 線

全格子点値と等値線値が与えられたとき、メッシュの各辺上に等値線値をもつ位置を求め、始点から終点に至るまで隣接メッシュを追跡するプログラムを開発した。辺上の位置は両端の格子点値から線形補間により求めた。

始点が境界上にあるときは終点も必ず境界上にあり、領域内部の格子線を順に走査して得られる始点から追跡すると閉曲線を描いて始点へもどる。

メッシュの辺上には同一等値線値をもつ点はひとつしかないから、一度連結された点は、その辺の座標を別表に登録しておくことにより、重複して新たに始点となることを避けることができる。

6. あとがき

ボーリング N 値による V_s 層の自動設定法が、マイクロ・ゾーニング的な振動シミュレーションを目的とする場合に、かなり実用的であることを示した。

また、収録されたボーリングの平面分布が一部に集中している柱状図ファイルを用いて、ボーリングの存在するメッシュは独立にすべて計算し、存在しないメッシュは数値的に補間するという機械的な処理方法を示した。

一般には、地盤特性が同質とみられる地域ごとに代表的な1地点を選定しており、その地域は数kmに及ぶメッシュに相当する。一方では、震害の度合いが数10m離れると著しく異なり、実際このような2地点の地震波形を比較すると、同じ地震とは考えられないほど異なっていることが多いといわれる。この意味では100mメッシュでも場所によっては粗らいといえることができる。

メッシュの大きさは、地盤特性の鉛直方向の変化と水平方向の変化が調和するように、目的に応じて定めるべきで

あろう。

補間によって地域全体の特性を結論することには無理があるとしても、柱状図から抽出された互いに独立な特性をもつ、多数のメッシュを一括処理する振動シミュレーションは意義のあることと思う。

また本稿の目的は、以上のような数値的な手法の紹介にあり、シミュレーション結果とモデル地区の地質的・土質的な地盤特性との比較検討はあえて行なわなかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり有益な助言をいただいた早稲田大学理工学研究所の那須信治博士に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 幾志・菅原・清水：電算機による都市地盤土質柱状図資料の一検索法，土と基礎，Vol.19—4, 5.
- 2) 幾志：地盤資料の電算化と検索法，講座，土と基礎，Vol. 21—3
- 3) 幾志：都市地盤土質柱状図データの検索，情報管理，Vol. 18—3
- 4) 那須信治：地盤震害と地盤調査の必要性，関東大地震50周年論文集，東大地震研究所
- 5) 太田裕他：S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み，地震学会'76春季大会予稿集
- 6) 望月利男・松田磐余他：地盤の応答計算と東京都区内地盤の応答特性，土と基礎，Vol.23—12.
- 7) 今井常雄・吉村正義：軟弱地盤における弾性波速度と力学特性，土と基礎，Vol.18—1
- 8) 土田肇他：各種調査法による地盤の固有振動数の比較，土と基礎，Vol.24—3.
- 9) 矢作枢他：東京チュウ積地盤の地震時応答の予測，土と基礎，Vol.23—12.
- 10) 鏡味洋史・小林啓美：水平な多層地盤でのS波の重複反射による増幅，日本建築学会論文報告集第173号
- 11) 表俊一郎・中島直吉：川崎市地盤増幅度分布に関する調査研究，川崎市の震災予防に関する調査研究報告書'75.8，川崎市防災会議地震専門部会.
- 12) 幾志：格子平面における補間と等高線追跡，情報処理学会，'76第17回大会予稿集 (原稿受理 1976. 9.10)

『設計施工基準集(施工編)』

編集発行 土 質 工 学 会

○ 土 工

定価 4,800円 会員特価 3,800円

送料(1冊)240円 B 5判・468ページ

社団法人 土 質 工 学 会

東京都港区西新橋1丁目13番5号(東亜別館)

〒105 ☎(03)502-6256～9 振替東京 4-40786