震害予測のための土質柱状図データベースの利用手法

(Application Methods of the Database of Columnar Section of Soil intended for the Prediction of Seismic Damage)

幾 志 新 吉* (Shinkichi Kishi)

キーワード：地震／地盤／震害／振動／土の分類／
電算機の応用／ボーリング／リモートセンシング
(IGC : B 0)

1. ま え が き

昭和 39 年 6 月の新潟地震，更に昭和 43 年 5 月の十勝沖地震に際して，その被害と地盤との関連から，地盤測定の発展的推進とともに地盤関係資料の有機的な利用をはかるため，リファレンス・センターを設ける必要性が改めて認識されるに至った¹⁾。

これらの情勢にかんがみ，著者らは昭和 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・利用法の研究を行ってきた²⁾。そのひとつの方向は蓄積・検索法に関する情報処理手法の開発であり^{3), 4)}，一方は地震防災を指向した利用手法の開発^{5), 6)}である。

その間国内において，多摩地域の地盤地質の解明を目的とした，地質柱状図の電算処理に関する類似の研究が始められた⁷⁾。

本論文では，まずデータベースを概説し，次にそれを利用した地盤振動の計算法と江戸川河口地域への適用例について述べ，更に地震防災のための利用手法として，ランドサット土地被覆情報との整合について述べる。

2. データベースの概説

データベースには現在，首都圏 1 万本，静岡県下 4 千本の土質柱状図が収録されている。これらは主として構造物建設に伴う基礎調査のため実施されたものである。ボーリング位置は一辺約 100 m のメッシュ法で表している。

2.1 電算機への入力法

2.1.1 原資料の整理

原資料には，それが電算化された後も照合が必要なので，整理番号（ボーリング番号）を付けておく。例えば，事業区分ごとに大番号を付け，続いて整理順に通し番号

を付ければ番号の重複が避けられる。

ボーリング位置の表示は，国土地理院発行の 2 万 5 千分の 1 地形図（以後，単に地形図といえ，国土地理院発行の地形図をさす）の縦・横を 100 等分したメッシュによった。これは緯度 3.0"，経度 4.5" の大きさの標準的なメッシュであり，実用段階における他情報との整合が容易である。

さて本システムでは，本格的な土質的・地質的判断に基づく原資料記載内容の標準化や，メッシュ内の代表的柱状図の選択などを行わずに，記載をなるべく生のまま電算化する方針をとっている。このような普遍的な判断が一般に困難で有利でないことと，利用目的によって後の段階で変換し統一することがある程度可能だからである。

一方，原資料作成時において，日本統一土質分類法⁸⁾に基づく規格化や調査地点の汎用地形図への記入などの標準化が望ましい。

2.1.2 コーディング

定められた項目・様式・記号に従って，原資料を書き写す作業である。記号を定める際には，原名から連想しやすいこと（ニーモニックコード），記号を組み合わせたときに重複が起こらないこと，かつ，文字数を少なくすることなどを考慮した。

著者らが定め使用している，コーディングシートの様式と各種コード表については既に発表⁴⁾したのでここでは項目ごとに記入法を要約し，例として土質コード表を掲げるにとどめる。

まず，標題として，整理番号をはじめ，経緯度・標高・施行年月のほか，孔内水位・孔の深さを記入する。

次に，地層データは，地層ごとに，地層の深度・土質名・色調・記事を記入する。コードは基本要素について定められているので，混合したり組み合わせた名称の場合は基本コードを連記すればよい。記事文は土質名を主語とし，その土質が存在する位置と状態と量を述語として構成する。

最後に，標準貫入試験結果は，深度・打撃数・貫入量を深さ順に記入する。打撃数のみ記載された資料の場合

* 国立防災科学技術センター 研究室長（茨城県新治郡桜村天王台 3-1）
(1981.9.8 原稿受付・討議期限 1983.7.1)

図-7 液状化の予測調査のための砂層の検索・分類図

内の N 値が15より小であるか否かを類別するものである。同一メッシュ内に複数の柱状図がある場合はそのすべてについて検索した。

砂層の条件として、地層土質名が砂、粗砂、中砂、細砂のいずれか1つまたはそれらの複合したものとし、腐植物、貝殻、礫が混入している場合も対象とした。シルトなどでも振動による液状化の発生がないとはいえないが、この面の定説が乏しいことと、液状化の可能性がより大きく、常時は比較的良好な地盤として扱われている砂地盤に限定した。

飽和に関する条件はここでは全く与えていない。孔内水位の記載されていない柱状図も多く、一方静岡県では全般に地下水位が高いといわれているからである。

図-7に、検索結果のうち、2万5千分の1地形図「清水」の右下四半分の範囲を示す。分類記号の内容は次のとおりである（表示優先順）。

- L：20m以浅で、1点でも N 値が15以下となる厚さ3m以上の砂層が存在する。
- G：20m以浅で、 N 値がすべて15より大である厚さ3m以上の砂層が存在する。
- N：該当砂層は存在するが、いずれの砂層内にも N 値が皆無である。
- *：孔底が20m以浅で、その範囲には該当砂層は存在しない。

0：該当砂層が全く存在しない。

更に、全県にわたる検索結果から、柱状図内における該当砂層の存在の仕方によつて次のような特徴がみられた。括弧内に代表的地域名を記す。

- i) 5～10mの軟弱な表層地盤の下に存在する場合（清水港周辺、巴川流域）。
- ii) 海岸などの表層に存在する場合（由比）。
- iii) 砂以外の表土の薄い被覆層があるが、表層近くに存在する場合（太田川流域、沼津市内）。
- iv) 比較的堅い層の下で深い位置に存在する場合（焼津港周辺）。

ところで、データベースを利用することにより、上述の検索条件のみならず、検索方法そのものを適宜変更して検索を繰り返すことが可能となった。

3. データベースによる地盤振動の計算法

ここでは、柱状図記載の N 値からS波速度構造と地震基盤を電算機により自動的に設定し、重複反射法による鉛直一次元の応答計算を、平面的に分布する大量のボーリング地点に適用する一つの方法について述べる。そして筑波の当センター構内における、速度構造の実測値を含む柱状図と自然地震観測記録を用いて、この N 値による方法の妥当性を調べた。

3.1 N値による速度構造ならびに地震基盤の設定

3.1.1 層の区分

N 値からS波速度 V_s (m/s) を決定するいくつかの試みがなされ、その決定は 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^{(11),(12)}もある。ここでは、データベース利用の手法開発を目的としているので、最もパラメータの少ない次の型の実験式によった。

$$V_s = a \cdot N^b \quad (1)$$

ここに、 $a=76$, $b=0.39$ とする⁽¹³⁾。

層の区分は V_s に変換する前に N 値に関して行い、その区間の平均 N 値から V_s を計算した。層の区分法は次のとおりである。

ある深度における N 値 N_i に対して、 N 値のばらつきの許容度を表す幅

$$A\sqrt{N_i} \quad (2)$$

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一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て同じことを繰り返す(図-8)。この操作を孔口から孔底までの N 値について行くと、柱状図中の折れ線状の 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。

ここに係数 A は、それを大きくとれば層数が減り、小さくとれば増えるが、地盤の地域性から区分されるべき大体の層数を目安として定めている。また、(2)式は N 値が小さいところでは小さな変動をとらえ、 N 値が大きいところでは小さな変動は無視する効果をもつ。第1層については、構築物の基礎の指標としてよく用いられる値(例えば $N_0=30$)までが表層となるように次式の定数 N_0 を定める。

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

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、次

図-8 N値による地層区分

の理由で実行していない。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。ii) 薄い砂礫層の近辺など N 値の変動の激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入る。

3.1.2 工学的地震基盤の設定

このようにして設定された速度構造の、どこを地震基盤とみなしたらよいかという問題が残る。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 を互いに近い値にとって振動計算を行った結果⁽¹⁴⁾をみると、下部数層の波形が非常によく似ていることが分かる。このことから V_s の差の少ない下部数層については、その最上層のみを考えれば十分で、それ以下の層に関する計算は無意味となる。したがって地盤の応答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。

しかしながら、数 10m のボーリングでは、それより下層で V_s の差が小さくなるという深度に達しているものは少ない。ここで基盤の定義を更にゆるめて、 V_s が与えられた一定値を越える層を便宜上基盤とみなすことにする。この値は、構築物の支持層としての地層がもつ地

図-9 筑波構内柱状図と速度構造

質的な地域性を考慮して定める。

3.1.3 計算例

図-9 の柱状図の推定欄 ($5\sqrt{N}$, $10\sqrt{N}$ 欄) が N 値曲線から計算した速度構造である。同じく実測欄 (surveyed) に速度検層によって得られた実測層を示す。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 ごとに行われた。

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

次に実測波と推定波の波形の対応をみるために、図-10 に各速度構造による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構造についても、振幅・波形とも実測波とかなり一致している。

また、 $5\sqrt{N}$ とした層構造の基盤を深さ 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地表における波形が得られる。これは 24m 付近に存在する層が、その堅さと厚さから工学的に基盤となり得るものであるためと考えられる。

図-10 推定波と実測波の対比 (筑波)
($\Delta t=5\text{ms}$, 1974.11.30EW, 震源: 鳥島深さ 420km, 距離 700km, M7.6)

なお、震源が近い場合の地震波についても上述と同じ諸構造について計算を行い、推定波と実測波の概略の一致をみた。これらの例でみる限り、本節に述べた速度構造と地震基盤の設定方法が妥当であるといえる。

3.2 データベースへの適用

データベースに収録された柱状図データについて、前節の方法により速度構造を設定する。そのさい、すべての N 値が 50 に満たないボーリングを除外したうえで、柱状図の孔口から孔底へ N 値曲線を区分してゆき、各区間の平均 N 値から決定した速度が、基盤速度たとえば 350m/s を越えたときそこを基盤とする。

この方法によると基盤深度はメッシュごとに個々の値をもつことになるが、実際このようにして定められ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を確かめてある。

以上で、データベースに速度構造を設定する方法が示され、地盤の地域的な振動特性を調べる準備ができた。

なお、地層の密度については、記載のない柱状図が多く、密度は一般に速度に比べて変動の小さいものであることから、ここでは一定値とした。

4. 地盤の地域的振動特性と常時微動観測結果

前章までに述べた方法、すなわち N 値による速度構造と工学的基盤の設定方法および平面補間法によって推定した、地盤の地域的振動分布の妥当性を検証するため、江戸川河口地域の 45 地点において常時微動観測を実施し、推定された卓越周波数と観測された卓越周波数の地域的分布の特徴を比較した。

4.1 データベースによる卓越周波数の推定

式(2), (3)のパラメータは $A=5$, $N_0=20$, 基盤速度を 350m/s とし、等値線を描くための補間には 4 近点を用いた。なお孔底に至るまでのすべての N 値が 50 に満たないボーリングは除外した。またこの基盤速度は $N=50$ に相当している。結局、地層数は 1~4 層となった。

この速度構造において、周波数を 0.1Hz から 10Hz まで 0.1Hz 刻みで変えたときに、重複反射法に基づく周波数応答が最大となる周波数を推定卓越周波数として求めた。

4.2 常時微動観測

観測は、江戸川河口地域において、1979 年 10 月の夜間 3 回、移動式で計 45 地点で行った。1 地点あたりの観測時間は 3~5 分間であった。使用観測機器は、1Hz 速度型水平動地震計、増幅器、データレコーダである。

地点の選定はボーリング柱状図を検索・表示すること

図-11 推定と実測による地盤特性の地域的分布

によって行い、そのさい軟弱層の厚さ（基盤上面深度）に関する頻度、および観測地点の地域的分布がそれぞれ偏らないように、かつボーリング地点に極力近くなるようにした。

周波数分析は、観測波形の最も静かな（振幅の小さな）部分 10 秒間（10ms×1024 点）を再生記録から選んでスペクトル・アナライザーにかけ、最大応答値を与える周波数を卓越周波数として読み取った。このとき、明らかに風による振動や近くの民家・工場などから発する人工的振動はスペクトル上で除外した。

4.3 観測結果の検討

以上の結果をコンターとして地形図上に表したものが図-11 である。実線と点線は、それぞれデータベースから自動的に作図された $N=50$ 相当の基盤上面深度と卓越周波数のコンターである。一方、常時微動観測点を黒丸で、その卓越周波数のコンターを破線で記入した。観測点に記した数字は実測の卓越周波数 (Hz) である。

この図から、推定された卓越周波数（点線）と観測された卓越周波数（破線）のコンターの概形はほぼ一致している。1Hz のコンターの一致性は良いが、実測の 2Hz のコンターが、推定の 1.5Hz と 2.0Hz の中間に位置するという傾向がみられる。これは主に V_s の推定方法に起因するものと思われるが、推定式の形は(1)式としたままで、そのパラメータ a , b の値を、次に述べるような方法で定めることにより、推定値と実測値の一致性を上げることがある程度可能であろう。

すなわち、基盤上面深度（実線）と推定卓越周波数（点

線）のコンターがよく一致している。具体的には 40, 30, 20m の深度が、1.0, 1.5, 2.0Hz の周波数にそれぞれ対応していることから、 V_s の深さ方向の平均値が地域的にほぼ一定と考えれば推定された速度構造において 1/4 波長則が成り立っており、したがって速度構造を単層として扱ってもコンターの傾向は把握できるものと思われる。

そこで、この地域における速度構造を単層として扱うことにすれば、観測地点において、実測卓越周波数と軟弱地盤 ($N<50$) の厚さから 1/4 波長則によって V_s を計算することができる。そして V_s と観測地点の平均 N 値との間に(1)式を仮定すれば、その係数 a , b を最小二乗法によって求めることができる。

このようにして求めた N 値と V_s の関係式は地域性のあるものとなるが、これを用いて新たに速度構造を決定すれば、上述の推定値と実測値の一致性を向上させることができるであろう

し、またこの速度構造はこの地域における地震応答計算に利用できるであろう。

なお、上述の推定値と実測値のずれの原因が、 N 値のみによる V_s の推定式(1)自体にあるとしても、これを他の土質的諸指標を加味した関係式^{11),12)}に置き換える手続きは容易であるから、データベースの有効性が減じられるものではない。

また柱状図データは常時微動観測点より密に存在しており、実測で補間できなかった特異点が、両者のコンターの不一致箇所として見受けられる。

4.4 地震基盤についての考察

推定と実測による振動特性がほぼ一致したことから、 N 値のみによって定められた速度構造の有効性がある程度実証されたものとみることができよう。特に、地質的基盤が深い江戸川河口地域において、実測卓越周波数と基盤上面深度との間の相関が確認されたことは、一定の N 値をもって仮定した工学的基盤が実用に供し得ることを示したものとえよう。なお、この地域における $N>50$ の地層は洪積砂層である。

また、土丹層上面が浅くそれを直接地震基盤として設定することができる横浜市港北区と川崎市幸区内の矢上川をはさむ低地の 40 地点（東西 4km、南北 2km の範囲内）で、同様の観測と解析を行ったところ、この基盤の性質からして当然のことながら、実測卓越周波数は基盤上面深度との関係（1/4 波長則）をそのまま反映していた。

これら 2 つの地域において設定された工学的地震基盤

は、双方とも洪積層の上面ではあるが、一方は砂層であり、他方は土丹であるというように、地質的には異質のものである。以上のことから、その上部の沖積層の軟弱地盤の振動特性の工学的な解析には、実用上基盤の地質的な差異をあまり考慮しなくてもよいことが確認された。

5. ランドサット・データとの整合

ここでは、都市域における面的な地震防災のための手法開発を目的とした他情報との整合による土質柱状図データベースの利用法について述べる。すなわち、データベースより得られる地盤特性と、米国の陸域観測衛星ランドサットから得られる土地被覆を、経緯度による座標系において重ね合わせるものである。

5.1 軟弱地盤の層厚分布図

軟弱地盤の層厚分布図とは、データベースより得られる地盤特性の諸分布図のうち、最も基本的な $N=50$ の深度分布を求めたものである。2章3節で述べた平面補間法により、全格子点における深度分布が求められてい

写真-1 CRTに濃淡表示された軟弱地盤($N<50$)の層厚分布図(輝点はランドサット・データから抽出された水陸境界相当の輝度をもつ画素である)

写真-2 ランドサット・データから抽出された密集市街地

る。

写真-1は、この深度を10m間隔の階級に分け、各階級に画面右側のインデックスで示される濃度を割り当ててCRTに表示したものである。堅硬地盤を明るく、軟弱地盤を暗く表示した。地理的な位置関係を示すため、ランドサット・データから得られる、水域と陸域の境界ないしはそれと同等の輝度をもつ対象を白で表示した。

この地盤図の各濃度領域の境界線は、前述の図-11の基盤上面の等深線と全く同じものである。

5.2 ランドサット・データによる土地被覆分類

現在ランドサットのMSS(マルチ・スペクトル・スキャナー)の地上分解能は約80mである。このMSSデータから、都市域の土地被覆の代表的カテゴリーである密集市街地、住宅地、工場・倉庫などの大型建造物、グラウンドなどの空地、緑地、水域、更に田畑などの分類を電算機を用いて行うことが可能である。

写真-2は、写真-1と同一の範囲において、密集市街地を抽出したものである。ここでは表示上の見やすさから他のカテゴリーの表示は省略した。

5.3 地盤特性と土地被覆の重ね合わせ

写真-1と写真-2に示したそれぞれの情報は、それらの位置が経緯度による共通の座標系で表されている。

図-12は、写真-1の地盤特性と写真-2の市街地を、電算機内で重ね合わせ、2章3節で述べた投影法によって、XYプロッタに出力したものである。

軟弱地盤の厚さの平面分布は、 $N=50$ の等深線としてコンターで示した。○印は密集市街地、*印は写真-1の

図-12 地盤情報とランドサット情報の重ね合わせ

説明で述べた水陸境界相当の輝度をもつ対象物である。

図-11の地形図と図-12を対照すると、ランドサット・データから抽出された密集市街地が、地形図の斜線で塗りつぶされた市街地に対応しており、同時に地形図（昭和53年発行）にない市街地や埋立地がランドサット（1979年3月）により検出されていることが分かる。

この重ね合わせ手法により、軟弱地盤に立地する密集市街地や大形建造物の存在が明確にされ、更にこれら人工被覆の各カテゴリーの平均的振動特性を仮定できれば、地域的な震害評価がある程度可能である。また、定期的に得られるランドサット・データを重ねることにより土地被覆の変動をとらえることができるから、住宅地の増加などの都市域の変動に即応した震害評価も可能となる。

この課題においては、航空写真の併用による土地被覆の細分類や、更に社会的機能を含む土地利用分類の必要性が考えられる一方、震災予測が一般に500mメッシュで行われていることを考慮すると、ランドサット・データを用いたマイクロゾーニングが無意味とは思われない。ちなみに1982年に打ち上げが予定されているランドサットDでは地上分解能が30mに向上する¹⁵⁾。

6. ま と め

都市地盤土質柱状図データベースの蓄積・検索法に関する情報処理手法を一応完成し、地震防災を指向した利用手法、特に地盤振動計算の方法とその応用法の開発を行ったところ、次のことが結論された。

1) 土質柱状図データの信頼性に関する見方は多々あるが、これが手軽に収集し得る唯一の地盤情報であることから、いくつかの自治体において地質柱状図集の編集や液状化地点の予測調査などに、本データベースが利用されその実用性と有効性が実証された。

2) N 値から決定したS波速度構造と工学的地震基盤が、地盤の振動特性を表す第一近似としてかなり有効であることが、次の事柄から判明した。

i) 当センター筑波構内の地中と地表の地震観測記録において地表の推定波形と実測波形のよい一致をみた。

ii) 江戸川河口地域における常時微動卓越周波数と推定卓越周波数の、1Hzから2Hzにかけてのコンターの概形が一致した。

iii) 先に行った京浜地区における常時微動観測結果を併せ考慮すると、軟弱地盤の振動特性の工学的解析には基盤の地質的な差異はあまり影響していない。

3) 数値的な平面補間法が、地盤特性の地域的分布を求める近似法としてかなり実用性のあることが分かった。

4) ランドサットなどのリモートセンシング技術によ

る土地利用分布との整合により、面的地震防災に関する土質柱状図データベースの新しい活用法を示した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、暖かい御指導を賜った早稲田大学理工学研究所那須信治博士、同森岡敬樹博士および同大学理工学部教授竹内盛雄博士（現同大学理工学研究所）に深甚なる謝意を表します。また本研究の推進に御援助を頂いた国立防災科学技術センター菅原正巳前所長、同高橋博第二研究部長、およびデータベースの開発整備と常時微動観測にそれぞれ協力頂いた同諸星敏一、同木下繁夫両研究員に感謝致します。また共同で作成したデータベースの利用に御理解を頂いた静岡県地震対策課渡辺定弘主査（現土木部道路建設課主幹）に謝意を表します。

記 号 説 明

$A=N$ 値による速度構造の粗さを決める係数
 CRT=陰極線表示装置
 N_0 =速度構造の第1層を決める N 値
 V_s =S波速度

参 考 文 献

- 1) 科学技術庁資源調査会勧告第22号（1968）：都市域地盤決定に関する第2次勧告。
- 2) 那須信治（1973）：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，pp.329～343。
- 3) 幾志新吉・菅原正巳・清水良作（1971）：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，No.4，pp.23～30，No.5，pp.9～14。
- 4) 幾志新吉（1973）：電子計算機による都市地盤資料の検索法，「防災科学技術総合研究報告」，第31号，国立防災科学技術センター，pp.57～75。
- 5) 幾志新吉（1976）：土質柱状図ファイルによる地盤振動シミュレーション，「土と基礎」，Vol.24，No.12，pp.23～28。
- 6) 鏡味洋史・幾志新吉（1979）：川崎市における地震時液状化危険度の簡易判定，「国立防災科学技術センター研究報告」，第22号，pp.101～111。
- 7) 徳善 温・中山 俊雄・石村 賢二・小川 好（1976）：地質柱状図の電算化について，「東京都土木技術研究所年報」，pp.133～139。
- 8) 土質工学会（1973）：土質分類法ならびに分類結果表示法—1973，「土と基礎」，Vol.21，No.4，pp.64～70。
- 9) 種田 守（1975）：地図投影図法，オーム社。
- 10) 川崎市防災会議地震専門部会（1972）：土の流動化の予測に関する調査，「川崎市の震災予防に関する調査」，中間報告I，pp.161～165。
- 11) 太田 裕・後藤典俊（1976）：S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み，「物理探査」，Vol.29，No.4，pp.31～41。
- 12) 望月利男・松田磐余・宮野道雄（1975）：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，No.12，pp.11～17。
- 13) 今井常雄・吉村正義（1970）：軟弱地盤における弾性波速度と力学特性，「土と基礎」，Vol.18，No.1，pp.17～22。
- 14) 鏡味洋史・小林啓美（1970）：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，pp.31～36。
- 15) 宇宙開発事業団（1979）：地球観測衛星ランドサットDシステム概要。