

土質柱状図ファイルによる地盤の応答計算例

— 東京強震 (1894年) 波形の川崎地区への適用 —

幾 志 新 吉*

国立防災科学技術センター

Simulation of Ground Motion Using the File of Columnar Section of Soil

— The Application of the Seismic Wave of the Tokyo
Strong Earthquake (1894) to the Kawasaki Area —

by

Shinkichi Kishi

National Research Center for Disaster Prevention, Japan

Abstract

We have performed the research project "Research in the System of accumulation, retrieval and analysis of columnar section of soil in the urban area" since 1969.

An aim of the project is the development of system on accumulation and retrieval supposing a reference center. Another aim is the development of system on analysis and utilization, exemplified by automatic formation of soil profiles, N-value contours, maps of liquefaction and the simulation of ground motion.

In this study an application of computation method of ground motion using the file of columnar soil sections is described. The point is as follows.

Using an experimental formula to seek the velocity of S-wave from N-value, layers of different velocities and base rock are automatically determined, and the one-dimensional-vertical computation based on the multiple reflection theory is performed employing the abundant number of boring data representing each of the meshes on the plane.

As the incident seismic wave, that of the Tokyo Strong Earthquake (June 1894; by N. Nasu and T. Morioka) was used.

The result of this study showed that the computed acceleration and the data in the published report agreed in the intensity scale of Meteorological Agency of Japan.

As the conclusion this fact seems to support the validity of the simulation method described in this report.

* 第4研究部 情報処理研究室

まえがき

当所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。

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および地盤振動シミュレーションなどに代表される解析・利用法の開発である。

本稿では柱状図ファイルによる地盤振動計算法の応用例について述べる。振動計算の要旨は、 N 値から S 波速度 V_s を推定するひとつの実験式に基いて、速度層および地震基盤を機械的に設定し、重複反射理論による鉛直1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対して行なうものである（4章参照）。

入力地震波として、東京強震の（1894年6月）東京本郷における観測波形（那須・森岡による）を用いる。東京強震は、関東大地震等の相模湾形に対して、東京湾形と呼ばれる東京直下地震の波動形を示し、主要動部が短時間で終わる一方、加速度値はかなり大きいものである。

なお、川崎地区の柱状図ファイルには、深さ20~90m程度の約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）のメッシュ法で表わされている。

1. 観測波形の処理

原データはカード約300枚にパンチされた、サンプリング間隔20msで約

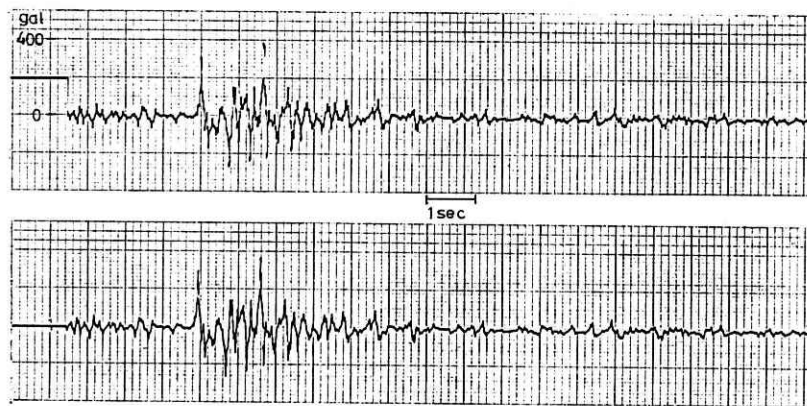


図1 東京強震観測波形と補間波形（本郷）
Fig. 1 Observed and interpolated seismic wave forms of Tokyo strong earthquake (Hongo)

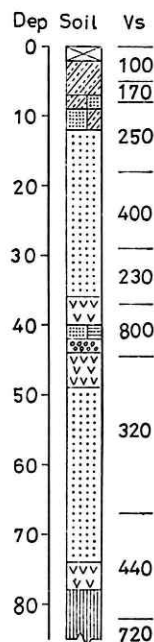


図2 本郷の地層データ
Fig. 2 Soil profile of Hongo

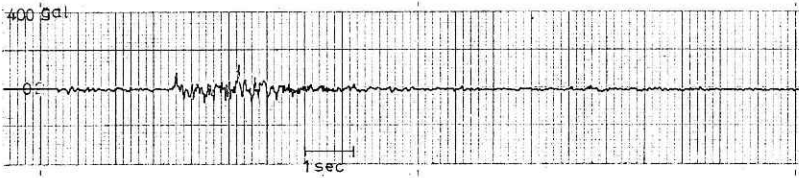


図 3 本郷の基盤における入射波
Fig. 3 Computed wave on the base rock of Hongo

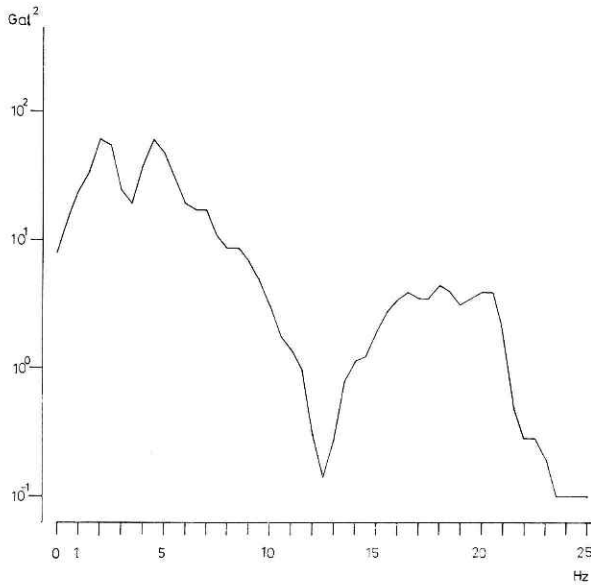


図 4 地表における観測波のパワー・スペクトル (本郷)
Fig. 4 Power spectrum of observed wave on the ground surface (Hongo)

3,000 個すなわち約 60 秒間の、東京本郷における SW-NE 成分の加速度波形で、最大加速度は約 380 gal である。

1.1 3 次補間

観測波形を 3 次補間し、10 ms 間隔のデータとして以下の解析を行なった。等間隔の場合の 3 次補間式は、

$$x(t) = \{-x(r-3\Delta t) + q \cdot x(t-\Delta t) + q \cdot x(t+\Delta t) - x(t+3\Delta t)\} / 16 \quad (1)$$

となる。 $\Delta t = 10$ ms としたのは、各地層の伝播時間の端数を小さくし、地盤の周波数特性をできるだけ損わないようにするためである。図 1 に観測波形と補間波形を示す。

1.2 本郷における基盤への入射波

本郷の地層データ (参考文献 8) による) を図 2 に示す。基盤を便宜上 G.L.-82m の土丹層に置き、上述の波形を地表へ入力し、重複反射計算を行なって得た基盤への入射波が図 3 である。これによると入射波の最大加速度は約 120 gal となる。

図4, 図5は地表および基盤への入射波の主要動部の前後20秒間のパワースペクトルである。スペクトルの計算方法は波動時系列のコレログラムをフーリエ変換し、ウィンドウと呼ばれるウェイトを掛けて3個の移動平均をとるものである。

なお、本稿の重複反射計算においては密度は一定とし、また減衰は考慮していない。

2. 川崎地区への適用

2.1 基盤の入射波の振幅

東京強震の震央を江戸川河口とし、本郷と川崎の震央距離をそれぞれ10km, 20kmとすると、坪井の式

$$\log A = M 1.73 \log \Delta + 0.83 \quad (2)$$

M : 地震のマグニチュード

Δ : 震央距離

A : 距離 Δ における最大振幅

から、振幅比は約1/3となる。

したがって、本郷における基盤への入射波の最大振幅120galを1/3倍して、40galとしたものを川崎地区の基盤への入射波とし、柱状図ファイルについて応答計算を行なった。

2.2 応答計算および計算結果

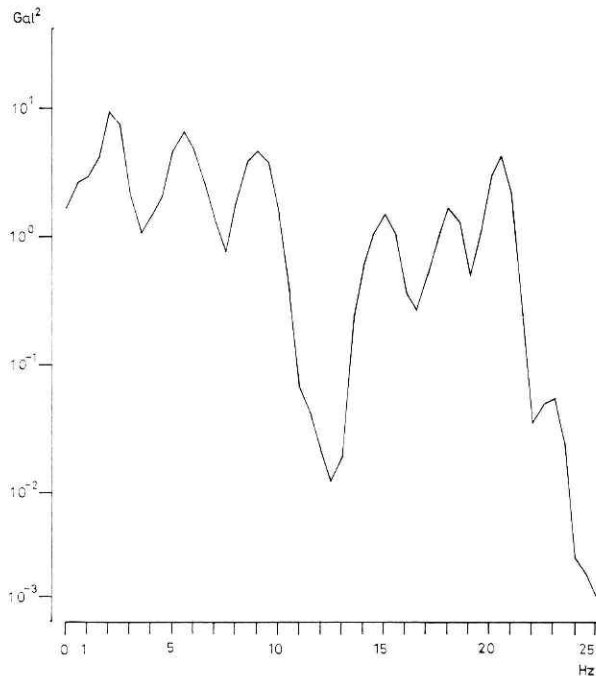


図5 基盤における入射波のパワー・スペクトル(本郷)
Fig. 5 Power spectrum of computed wave on the base rock (Hongo)

土質柱状図ファイルによる地盤の応答計算例—幾志

柱状図記載の N 値から S 波速度層の区分設定を行なう式 (4), (5) (4章) のパラメータは, $A=10, N_0=10$ とした. 1, 2層を区分する相当 N 値は $N_s=10\sqrt{10}\approx 30$ となる. 基盤は土丹層相当とし, 速度は 600 m/s と仮定した. これらのパラメータによる V_s 層の層数は台地から低地へかけて 3~6 層程度となった.

補間を用いる点の数は $m=4$ とした. すなわち 4 近点をもって補間した.

図 6, 図 7 に最大加速度の分布および等高線 (等加速度線) を示す. なお, 分布図中の値 (文字) と補間および平滑化を行なってから描いた等高線とは合致しないところもある.

この分布図から, 地表の最大加速度がおおむね, 台地で 150 gal, 低地で 125 gal となる.

ここに台地とは, 1:25,000 地形図「川崎」の左上四半分の領域 (図 6) を, 低地とは同じく右下四半分の領域 (図 7) を呼ぶものとする. 最大加速度の両域における差異については 3章で述べる.

ここで, 計算結果をさらに大局的に見て, 気象庁震度階により震度に直してみると, 東京 (本郷) の震度が N (250 gal) に対し, 川崎のそれが V (80~250 gal) となり, 図 8 の震度分

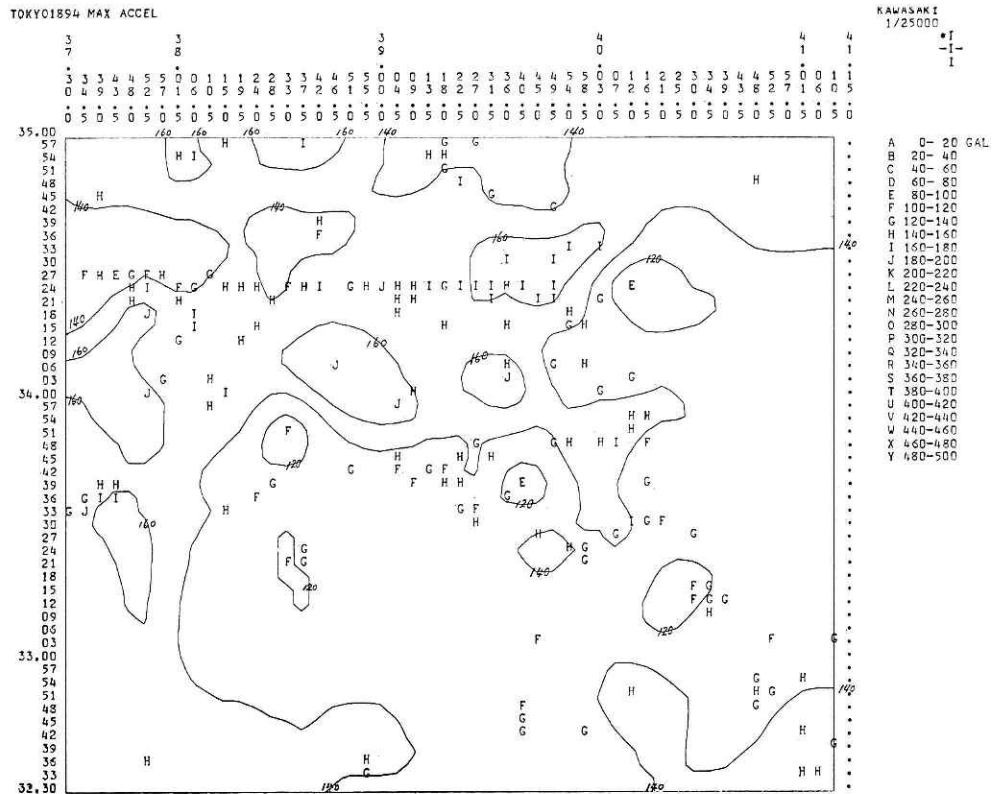


図 6 最大加速度分布・等加速度線 (「川崎」左上分)
Fig. 6 Distribution map of maximum acceleration (top-left quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)

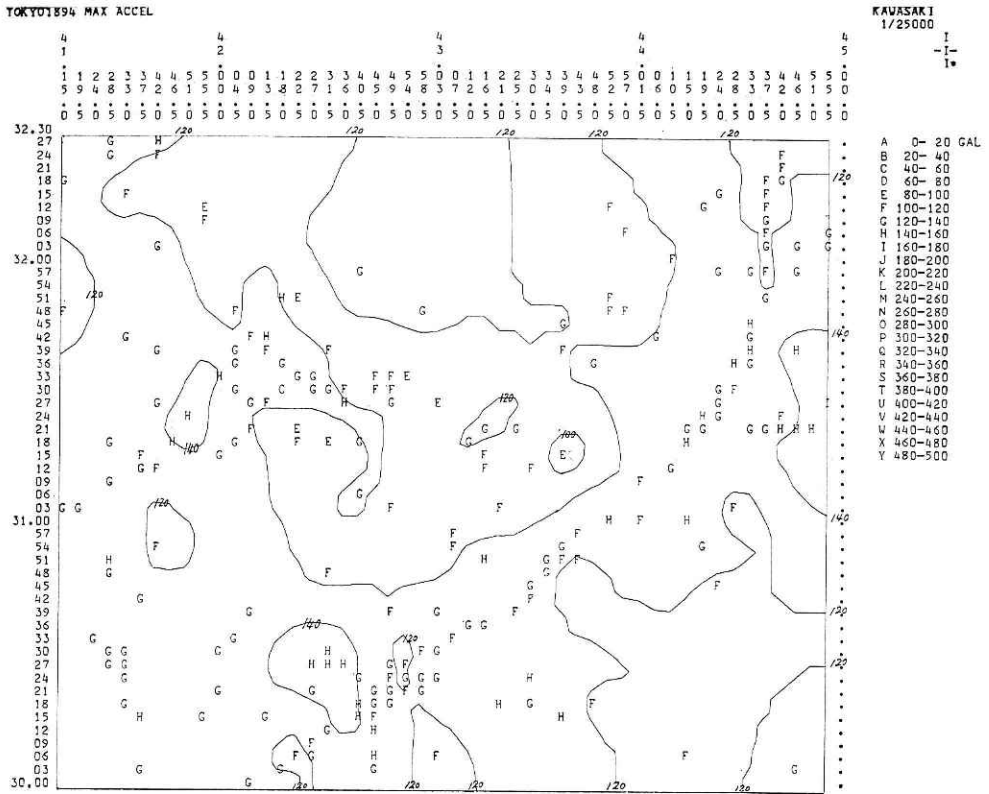
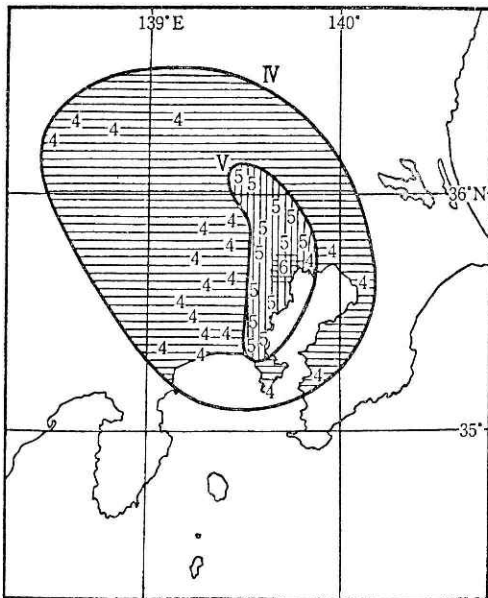


図7 最大加速度分布等加速度線 (「川崎」右下分)
 Fig. 7 Distribution map of maximum acceleration (bottom-right quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)



布 (参考文献 9) による) に一致することがわかる。

2.3 震央を川崎付近とした場合

東京湾を震央とする地震の波動特性は互によく似ているといわれる。そこで東京強震の震央を浦賀水道地震 (1922.4) の震央、すなわち川崎付近へ移して考えることができる。このときは本郷の基盤推定波を直接川崎への入力波とすればよい。この場合の最大加速度分布は、先述の結果を一樣に3倍すれば得られる。したがって最大加

図8 東京強震の震度分布(萩原による)
 Fig. 8 Intensity map of Tokyo strong earthquake

速度分布は、おおむね 400 gal のオーダーとなる。

3. 最大加速度と地盤の固有周波数・増幅度の関係

ここで、柱状図記載の N 値から機械的に設定された地層モデルについて、一般的な地盤振動特性を調べてみる。ここに、地盤の固有周波数とは最大増幅度を与える周波数の意とする。

図 9, 図 10 は、周波数を 0.1 Hz から 10 Hz まで 0.1 Hz 刻みで変えたときの、増幅度の最大値を示すものである。

図 11, 図 12 は、そのときの周波数を示している。

表 1 は、図 11 と図 6 より作成した、固有周波数と最大加速度の相関表で、度数は格子点の数に相当する。これによると、加速度が大きな格子点の固有周波数が、入射波の卓越周波数 (図 5) に一致していることがわかる。その該当部分を太枠で囲んで示した。

つぎに、表 2 に、1.5~3.0 Hz (階級文字 DEF) の固有周波数をもつ格子点についての、

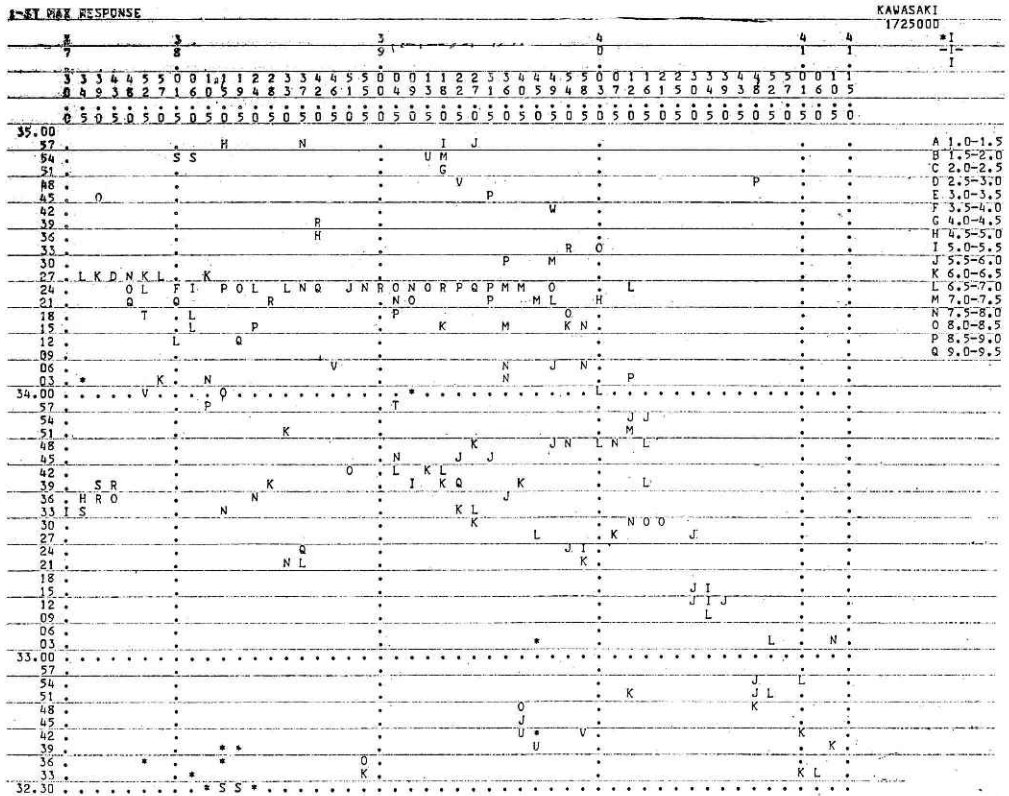


図 9 最大増幅度分布 (「川崎」左上分)
 Fig. 9 Distribution of maximum response (top-left quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)

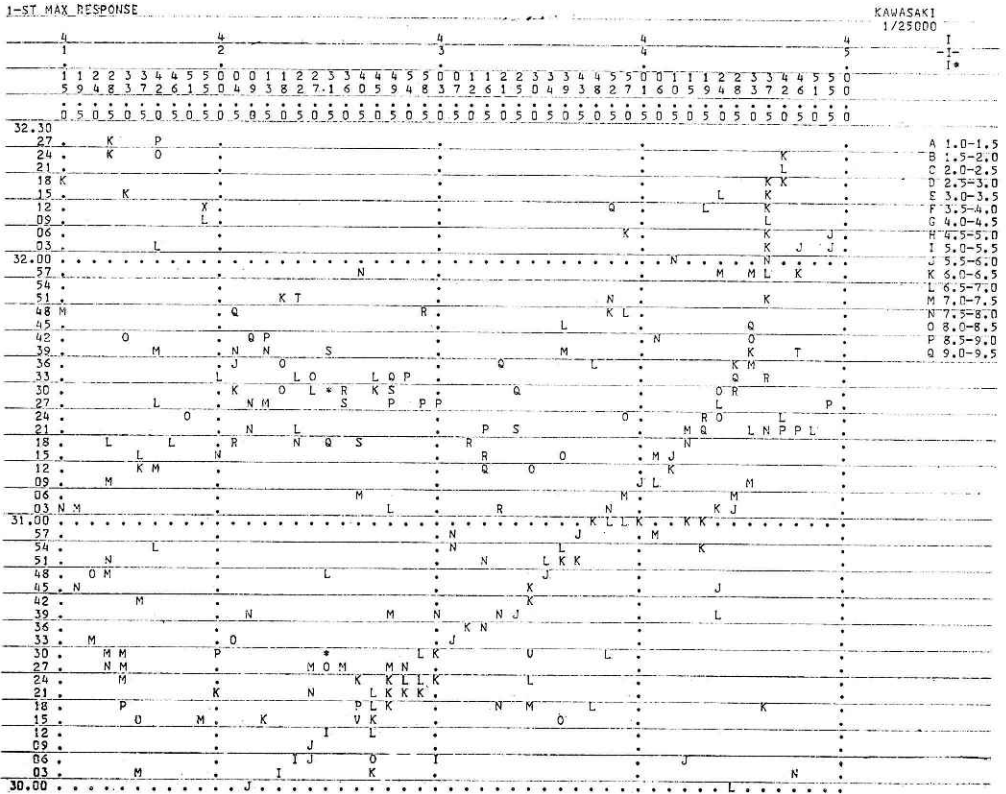


図 10 最大増幅度分布 (「川崎」右下分)
 Fig. 10 Distribution of maximum response (bottom-right quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)

最大増幅度 (図9) と最大加速度 (図6) との関係を示した。これによると両者に正の相関が認められる。

これらは、地盤の固有周波数が、入射波の卓越周波数に一致すれば振幅は大きくなり、それは増幅度が大きいほど大きくなる、という一般的な事柄が、柱状図ファイルを利用した応答計算法においても当然のことながら成り立つことを示している。

ここで東京強震の場合、その基盤への入射波の卓越周波数が 2 Hz にあり、一方川崎地区の地盤の固有周波数が、おおむね台地 (図11) で 2 Hz、低地 (図12) で 1 Hz であることから、台地の加速度が低地のそれより比較的大きく出ることが説明される。

4. 柱状図ファイルを利用した地盤の応答計算法

本稿における応答計算法および計算結果の表示法は、参考文献5), 11) に示した方法である。ここでその計算手続きの要点を述べる。

4.1 N 値による S 波速度層の自動設定

土質柱状図ファイルによる地盤の応答計算例—幾志

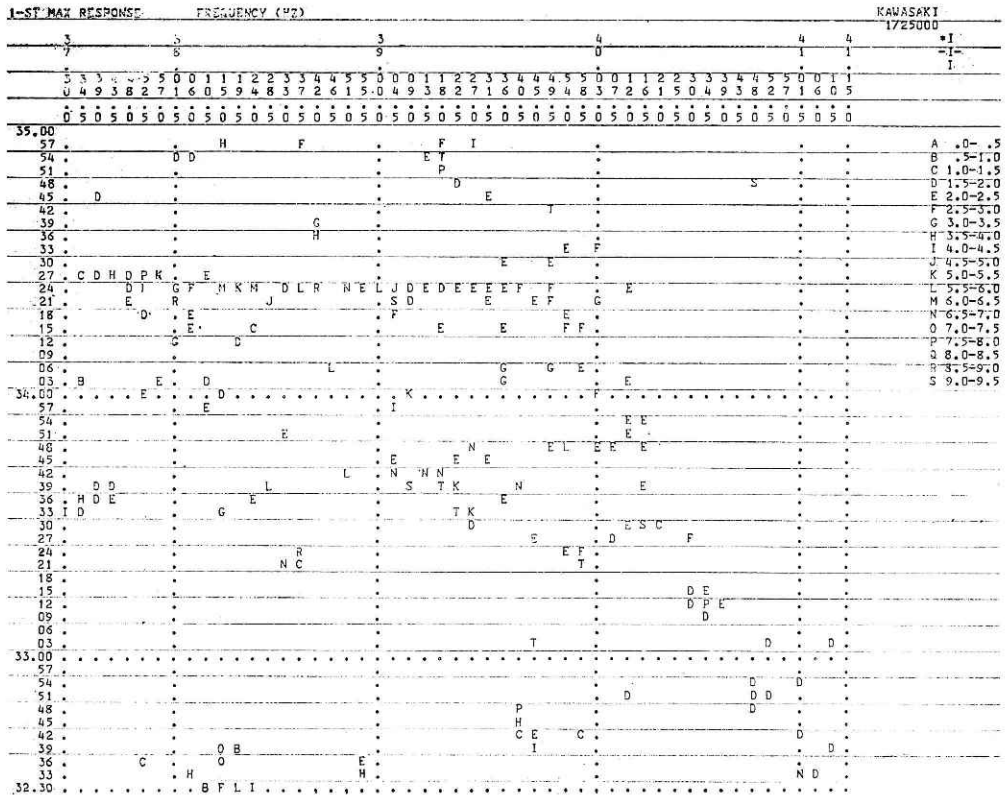


図 11 固有周波数分布 (「川崎」左上分)

Fig. 11 Distribution of characteristic frequency (top-left quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)

表 1 固有周波数・最大加速度相関表

Table 1 Correlation table between characteristic frequency and maximum acceleration

周波数 Hz	加速度 gal	E	F	G	H	I	J	K	計	増幅度 Hz	加速度 gal	E	F	G	H	I	J	K	計
		80 100	100 120	120 140	140 160	160 180	180 200	200 220				80 100	100 120	120 140	140 160	160 180	180 200	200 200	
C	1.0~1.5		1	4	2				7	M	6.0~6.5				1	1			2
D	1.5~2.0	1	4	12	11	7			35	N	6.5~7.0		5	3					8
E	2.0~2.5	1	7	8	19	10	2		47	O	7.0~7.5								0
F	2.5~3.0		4	2	2	5			13	P	7.5~8.0		3	1					4
G	3.0~3.5		3	1	2	2			8	Q	8.0~8.5								0
H	3.5~4.0	1		5					6	R	8.5~9.0		1		1		1		3
I	4.0~4.5			1	1			1	3	S	8.0~9.5			2	2				4
J	4.5~5.0				2				2	T	0.5~10.5		2	1	3				6
K	5.0~5.5		1		4				5										
L	5.5~6.0		1	2	1	2	2		8	計		3	33	42	50	27	5	1	161

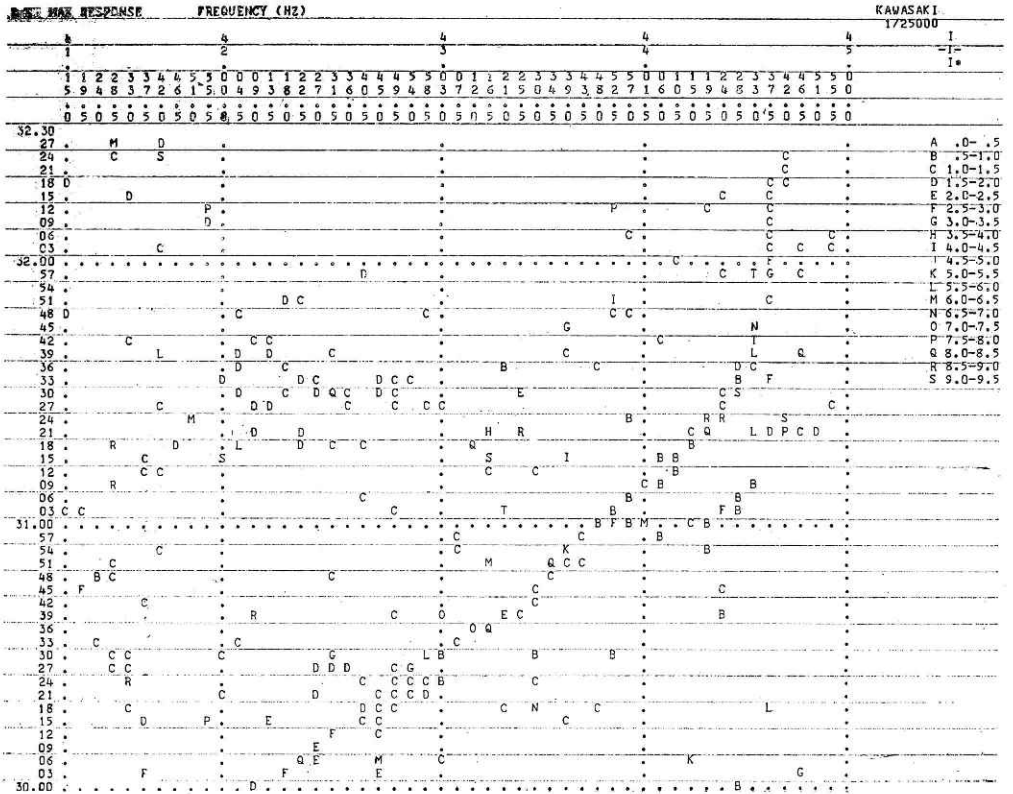


図 12 固有周波数分布 (「川崎」右下分)
 Fig. 12 Distribution of characteristic frequency (bottom-right quarter of 'KAWASAKI' quadrangle)

表 2 最大増幅度・最大加速度相関表 (固有周波数 1.5~3.0 Hz)
 Table 2 Correlation table between maximum response and maximum acceleration

増幅度	加速度 gal								計	増幅度	加速度 gal								計
	E	F	G	H	I	J	K				E	F	G	H	I	J	K		
I	5.0~5.5		3	1					4	Q	9.0~9.5				1	1			2
J	5.5~6.0	1	2	5	5				13	R	9.5~10.0			1		3			4
K	6.0~6.5		3	7	2				12	S	10.0~10.5				2	2			4
L	6.5~7.0	1	4	4	6				15	T	10.5~11.0					2			2
M	7.0~7.5		2		1	3			6	U	11.0~11.5				1				1
N	7.5~8.0		1	2	5	3	1		12	V	11.5~11.0					1	1		2
O	8.0~8.5				6	4			10										
P	8.5~9.0			2	2	4			8										
										計		2	15	22	31	23	2		95

いくつか提唱されている、 N 値あるいはその他の土質的指標から S 波速度 V_s を推定する実験式のうち、最もパラメータの少ない次式によった (参考文献 10) による).

$$V_s = 76N^{0.39} \quad (3)$$

層の区分は、 V_s に変換する前に N 値に関して行なう。

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,

$$N_{\max} - N_{\min} > A\sqrt{N_i} \quad (4)$$

$N_{\max} = \text{Max}\{N_i, \dots, N_j\}, N_{\min} = \text{Min}\{N_i, \dots, N_j\}$ 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 値をまとめて行く (図 13). A は N 値のバラツキの許容度を表す係数である. A を大きくとれば層数は減り, 小さくとれば増える.

第 1 層については, 一応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 を定める.

$$A\sqrt{N_0} = N_s \quad (5)$$

以上で, 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.

つぎに, 地震基盤の設定であるが, これは 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定義する.

なお層の区分法として, 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るが, いくつかの理由により実行していない.

4.2 平面分布図の補間法と等高線作図法

規則的な格子平面において, 値の存在する点 (実測点) が不規則に散在するとき, 値のない全格子点 (補間点) の値を補間し, 等高線を作図する一方法である.

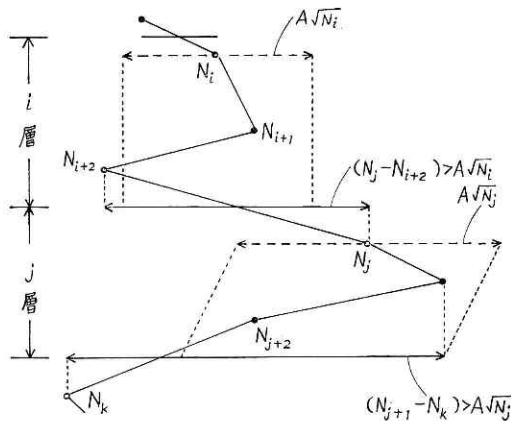


図 13 N 値による地層区分

Fig. 13 Separation of soil layer using N -value

P_o, Z_o : 補間点および補間値

P_k, Z_k : 実測点および実測値

r : 補間点と実測点間の距離 $|P_k - P_o|$

w : 重み

m : 補間に用いる実測点数

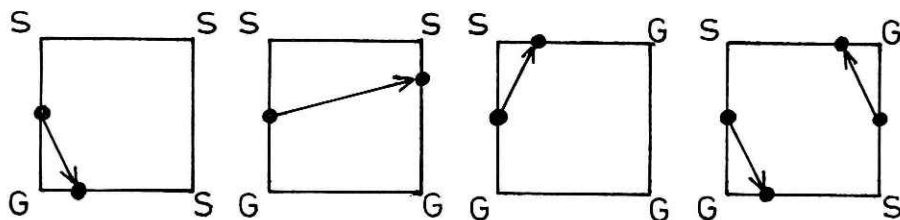
n : 総実測点数

とするとき、つぎの関係式によって補間値を求める。

$$\left. \begin{aligned} Z_o &= \sum_{k=1}^m w_k Z_k, \quad w_k = \frac{1}{r_k} / \sum_{k=1}^m \frac{1}{r_k} \\ r_1 &\leq r_2 \leq \dots \leq r_m \leq \dots \leq r_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

つぎに、全格子点値と等高線値が与えられたとき、格子の各辺上に等高線値をもつ位置を求め、始点から終点まで隣接格子を追跡して等高線を描く、辺上の位置は両端の格子点値から線形補間により求める。

ひとつの格子を構成する4格子点値の大小関係は、4点とも等しい場合を除いて、図14の場合で尽される。



$G > H > S$

図 14 格子点値の大小関係と等高線値追跡
Fig. 14 Mutual relation of the value of lattice point and tracing of contour

あとがき

東京強震の本郷における観測波形を用いた、川崎地区地盤の応答計算結果を地域的にならしてみると、公表されている被害地震の資料（参考文献 9）と震度の尺度において合致することを見た。このことは、柱状図記載の N 値を利用した応答計算法に対し、現実的な裏付けが得られたものといえよう。

他方、柱状図ファイルに収録されたボーリングの地点は一辺約 100m のメッシュで表わされており、今後常時微動等のデータを照合しながら、マイクロ・ゾーニング的な規模における、ファイル利用の有効性について研究を進める予定である。

おわりに、貴重な東京強震波形のデータの利用を許して下さった、早稲田大学理工学研究所の那須信治氏、森岡敬樹氏に謝意を表します。

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 (1971)
- 2) 幾志：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 (1973)
- 3) 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 (1973)
- 4) 諸星・幾志：土質断面図の検索・表示・応答システム，セ研報第 17 号 (1977)
- 5) 幾志：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. 24-12 (1976)
- 6) 那須信治：大地震の地動，防災科学技術 No. 26 (1974)
- 7) 森岡敬樹：直下型地震とその考察，第 3 回地盤振動シンポジウム資料集 (1974)
- 8) 那須・竹内・森岡・山田：烈強震地動の構築物に及ぼす影響，日本地震工学シンポジウム論文集 (1975)
- 9) 宇佐美：日本被害地震総覧，東大出版会 (1975)
- 10) 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 (1970)
- 11) 幾志：格子平面における補間と等高線追跡，情報処理学会第 17 回大会予稿集 (1976)

(1977 年 7 月 12 日 原稿受理)