

# 名古屋地盤のS波増巾度特性

正木和明・坪井利弘・谷口仁士・飯田汲事

## Seismic Amplification of S Waves in Nagoya Area

Kazuaki MASAKI, Toshihiro TSUBOI,

Hitoshi TANIGUCHI and Kumizi IIDA

名古屋地盤35地点においてボーリング調査を実施し、地盤内のS波速度、密度分布を求めた。S波速度、密度は4つの指標（N値、深度、地層年代、土質区分）の関数として表現されると仮定し、得られたデータからS波速度、密度と四つの指標との関係式を求めた。

名古屋地盤を約400のメッシュに分割し、各メッシュについて四つの指標が記載されているボーリングデータを名古屋地盤図より抜き出し、上記関係式を用いて、S波速度、密度を計算した。Herrera and Rosenblueth(1965)のS波多重反射理論を用いて各メッシュ地盤のS波増巾度曲線を求めた。

濃尾地震被害率と増巾度との関係を調べた結果、増巾度が6以上になると被害が増大することがわかった。このことを考慮すると、増巾度が6以上となる市北西地域および南部臨海地域は地震被害の危険度が高いことが予想される。

### 1. はじめに

一般に地震被害はわずかに数百米しか離れていない二点においてもその程度に大きな差が生じることは過去の地震調査からも明らかである。この程度の距離では入力地震波、基礎地盤構造は同一とみなしてよいからその原因は地盤地表層の構造の差、あるいはそれを反映した地盤の振動特性の差にあると考えられる。従って、数百米のオーダーで地盤構造、地盤振動特性を求めることは地震工学上重要であると思われる。この観点から、名古屋地盤を1kmのメッシュに分割し、各メッシュ地盤の深度方向のS波速度および密度を推定し、S波多重反射理論を用いて地盤の増巾度特性を計算した。得られた各メッシュの増巾度の分布を示すとともに、過去の地震被害との関連も調べたので報告する。

### 2. 解析方法

#### 2・1 計算方法

増巾度特性の計算はHerrera and Rosenblueth(1965)の方法<sup>1)</sup>を用いて行なった。即ち

- (1) 地盤は水平多層構造である。
- (2) S波が鉛直下方より入射する。
- (3) 粘性によるエネルギーの損失はない。

と仮定し、境界条件として

- イ) 地表面ではせん断応力はゼロ。

ロ) 各層の境界面で、せん断応力および変位は連続。を与え、運動方程式

$$\rho_n \cdot \frac{\partial^2 U_n}{\partial t^2} = G_n \cdot \frac{\partial^2 U_n}{\partial Z_n^2} \quad (1)$$

を解く。途中の式の展開は省き結果のみを示す。増巾度Aは

$$|A| = \frac{2}{|S_2 + iS_1|} \quad (2)$$

と表わされる。ただし

$$\begin{Bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{Bmatrix} = T_{n-1} \cdot T_{n-2} \cdots T_1 \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$T_{n-1} = \begin{bmatrix} \cos \lambda_{n-1} & \sin \lambda_{n-1} \\ -r_{n-1} \cdot \sin \lambda_{n-1} & r_{n-1} \cdot \cos \lambda_{n-1} \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{n-1} = \frac{\omega}{V_{n-1}} \cdot h_{n-1}$$

$$r_{n-1} = \frac{\rho_{n-1} \cdot V_{n-1}}{\rho_n \cdot V_n}$$

である。即ち第n番目の層のS波速度 $V_n$ と密度 $\rho_n$ と層厚 $h_n$ が与えられれば容易に増巾度 $A(\omega)$ を計算することができる。

#### 2・2 S波速度、密度の推定

前節で述べたように増巾度の計算に際しては深度別のS波速度と密度が必要である。著者等は昭和49年来、名古屋地盤15地点においてボーリング孔を掘削し、PS換

層を実施してS波速度を求めてきたが、他機関による調査地点を合わせても35地点しかなく、今回目的としている1 kmメッシュごとの地盤増幅度を計算するためには充分ではない。しかし幸運にもボーリング調査はほぼ名古屋地盤をおおむね多くの点で実施されている。そこでボーリング調査の際、一般に測定される標準貫入試験N値等の土質指標からS波速度・密度を推定し、これを入力データとして計算することが可能である。

S波速度とN値の関係については多くの関係式が提唱されているが、しかし、S波速度が地層物質の組織、構成、おかれた状態等々のもたらす一つの反応量であることを考えるとN値のみとの関係でとらえることは不自然である。図1は地質別(粘土, シルト, 砂, 砂礫), 年代別(沖積層, 洪積層)に区分した上でS波速度とN値との関係<sup>2)</sup>を示したものである。図中実線は洪積層について、破線は沖積層について、S波速度とN値との関係を最小自乗法で求めた直線である。図1が示すようにS

波速度はN値だけでなく地質、地層年代とも関係がある。

そこでN値、地質、地層年代に深度も考慮に入れたS波速度推定式を求めた。求め方は林知己夫(1961)の数量化理論<sup>3)</sup>によった。即ち、地質、地層年代は本来定性的なものであるがこれを数量化することにした。地層年代は沖積層、洪積層、第三紀層に区分し、沖積層を1.00として基準化した。

S波推定式を名古屋地盤35地点での各深度でのS波速度を用い他の土質指標4種類9項目の任意の組合せ15通り全てについて求め、その結果を表1に示した。同表には標準誤差・相関係数がそれぞれ記入されており、相関係数の低いものから並べてある。指標の組合せとその相関係数の関係を図2に示した。この図より、指標数がふえると相関係数は最大となり、0.86であった。

密度推定式の算出も上記地点での密度と他の土質指標を用いて行った。密度は標準貫入試験時に採取したボーリングコアの重量と体積から求めた。実測密度と推定密

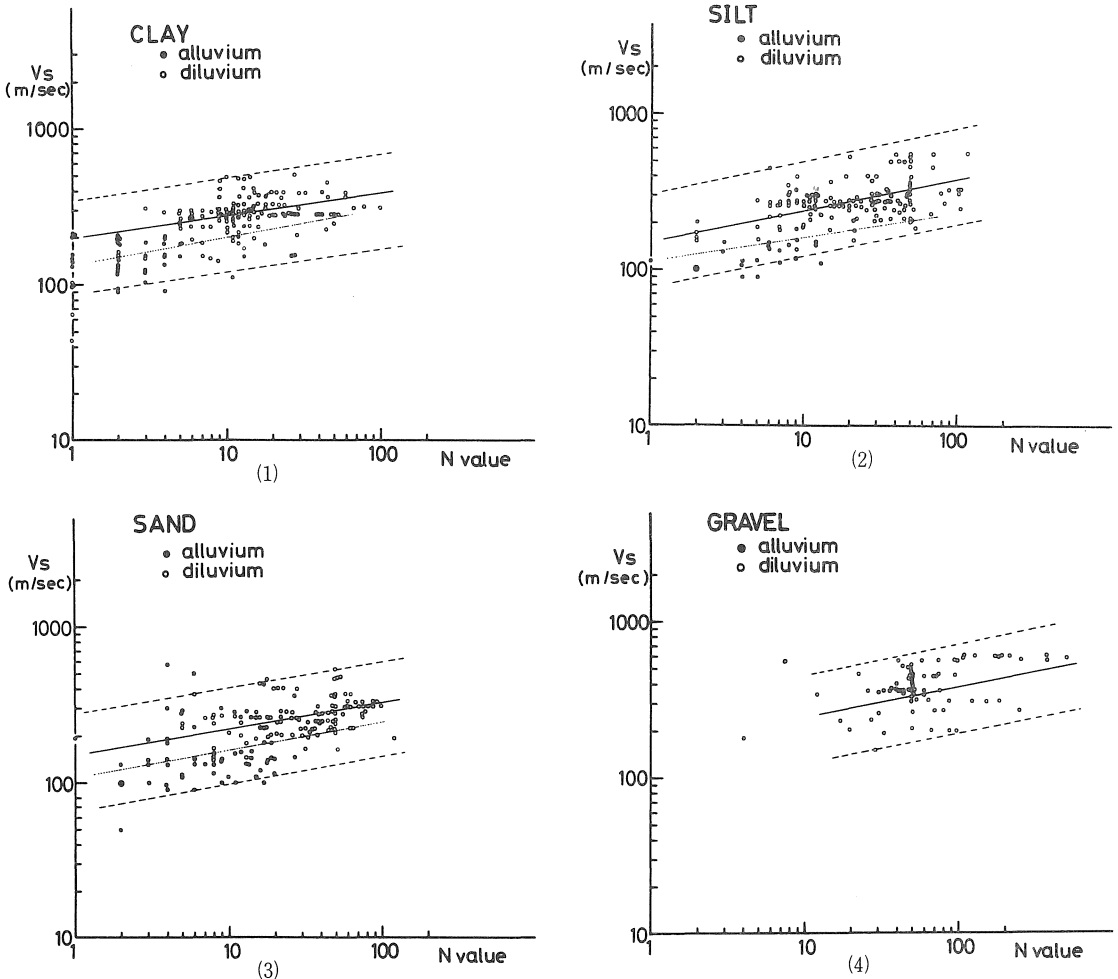


図1 N値とS波速度との関係

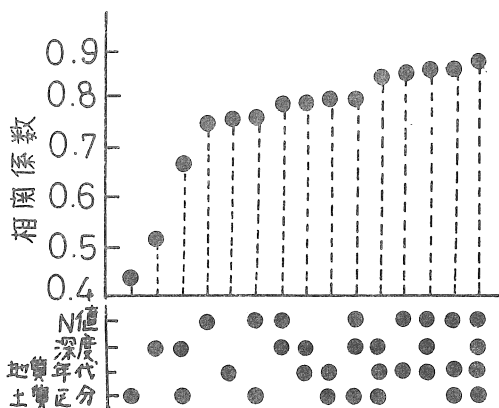


図2 指標の組合せとS波推定式の相関係数

度との相関係数はS波速度推定式の場合と同じく、四つの指標を用いた時に最大となり、0.55であった。

得られたS波速度および密度推定式を示す。

$$V_s = 100N^{0.15}H^{0.10} \begin{bmatrix} 1.00 \text{ 沖積層} \\ 1.33 \text{ 洪積層} \\ 1.73 \text{ 第三紀層} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.00 \text{ 粘土} \\ 0.87 \text{ シルト} \\ 0.86 \text{ 砂} \\ 0.99 \text{ 砂礫} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\rho = 1.66N^{0.03}H^{-0.01} \begin{bmatrix} 1.00 \text{ 沖積層} \\ 1.01 \text{ 洪積層} \\ 1.01 \text{ 第三紀層} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.00 \text{ 粘土} \\ 1.01 \text{ シルト} \\ 1.04 \text{ 砂} \\ 1.06 \text{ 砂礫} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで各単位は、 $V_s$  : m/sec,  $H$  : m,  $\rho$  : g/ccである。

### 2・3 地震基盤の設定

名古屋地盤は上位より沖積層、洪積層（熱田層，八事層，唐山層），第三紀層（矢田川累層）が堆積し，各層は南西方向にゆるく傾斜している。このため，名古屋市東部地域では第三紀層が直接地表に露出しているが，南西部地域では深さ200mに達している。市南部では沖積層が50m程度堆積している。市の中心地域では洪積層が露出し，ゆるやかな丘陵を形成している。地震基盤として，第三紀層下位の花崗岩層を考え得るが，ここではメッシュの大きさも考慮して，比較的構造のわかっている第三紀層を地震基盤とした。

### 2・4 メッシュ区分と入力データ

名古屋地盤上を通る経度，緯度を基準とし各1分をさらに2等分してメッシュ区分を行なった。従ってメッシュの一辺は約1kmである。名古屋地盤図<sup>5)</sup>に記載されているボーリング実施地点を各メッシュ1地点選出し，そのデータを用いて計算を行なった。ボーリング実施地点が数地点ある場合は代表的な地点を選んだ。

## 3. 解析結果

粒度分布，N値，P波速度，S波速度および密度の深

表1 諸指標の各種組み合わせから求められた実験式

No.	実験式	標準誤差	相関係数
1	$V_s = 224 \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.08 \\ 0.99 \\ 1.60 \end{bmatrix}_F$ (m/sec)	76	0.44
2	$V_s = 110H^{0.30}$	72	0.52
3	$V_s = 92H^{0.30} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.09 \\ 1.13 \\ 1.65 \end{bmatrix}_F$	62	0.67
4	$V_s = 109N^{0.29}$	56	0.75
5	$V_s = 143 \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.96 \\ 2.76 \end{bmatrix}_E$	55	0.76
6	$S'_v = 120N^{0.31} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.84 \\ 0.74 \\ 0.86 \end{bmatrix}_F$	54	0.76
7	$V_s = 81N^{0.24} H^{0.15}$	53	0.78
8	$V_s = 111H^{0.13} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.68 \\ 2.36 \end{bmatrix}_E$	52	0.78
9	$V_s = 151 \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.87 \\ 2.63 \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.91 \\ 0.91 \\ 1.13 \end{bmatrix}_F$	51	0.79
10	$V_s = 89N^{0.24} H^{0.15} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.90 \\ 0.85 \\ 1.02 \end{bmatrix}_F$	51	0.79
11	$V_s = 106H^{0.16} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.51 \\ 2.11 \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.95 \\ 0.99 \\ 1.26 \end{bmatrix}_F$	47	0.83
12	$V_s = 111N^{0.16} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.51 \\ 1.93 \end{bmatrix}_E$	45	0.84
13	$V_s = 91N^{0.15} H^{0.11} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.51 \\ 1.93 \end{bmatrix}_E$	44	0.85
14	$V_s = 121N^{0.18} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.47 \\ 1.88 \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.83 \\ 0.79 \\ 0.89 \end{bmatrix}_F$	44	0.85
15	$V_s = 100H^{0.15} H^{0.10} \begin{bmatrix} 1.00 \\ 1.33 \\ 1.73 \end{bmatrix}_E \begin{bmatrix} 1.00 \\ 0.87 \\ 0.86 \\ 0.99 \end{bmatrix}_F$	42	0.86

注： $\begin{bmatrix} \text{沖積層} \\ \text{洪積層} \\ \text{第三紀層} \end{bmatrix}_E$   $\begin{bmatrix} \text{粘土} \\ \text{シルト} \\ \text{砂} \\ \text{砂礫} \end{bmatrix}_F$

度方向分布の1例として名古屋市立日比津小学校における結果<sup>6)</sup>を図3に示す。S波速度分布図中の実線はP S検層による現位置測定のス波速度を示し，破線はS波速度推定式(4)から導かれたS波速度を示している。現位置測定S波速度は3段階で比較的ゆるやかに増大するのに対し，推定式から導かれたS波速度は，地層年代が沖積

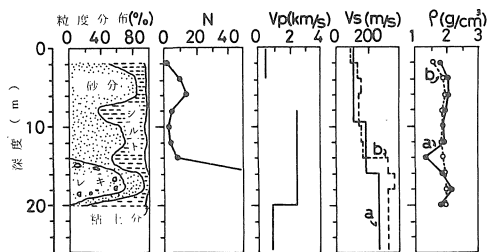


図3 日比津小学校のS波速度と密度分布  
a : 実測値 b : 計算値

層から洪積層に変化し、地質が砂レキ分が多くなり、N値が急増する深度15mあたりで急に大きくなる。しかし、全体的にはかなりの一致とみなされるであろう。密度分布図中の実線は標準貫入試験の際採集したコアの体積と重さから計算した密度の分布を示している。また破線は推定式(5)から導かれた密度の分布を示している。深度15mでの値に大きな差があるが、実測密度は1.5と小さすぎ、むしろ推定式から導いた密度の方が妥当と思われる。他の深度では両者はよい一致を示している。

図3に示したS波速度、密度からS波重複反射理論を用いて求めた増幅度曲線を図4に示す。実線は図3の実線データ、破線は図3の破線データを用いて計算した結果である。解析は0~10Hzの周波数領域で0.05 Hzきざみで計算してある。増幅度は(2)式で定義してあるので0Hzでの増幅度は2となっている。実線、破線とも2.5 Hz付近にピークのひとつがあり、破線ピークの方がや

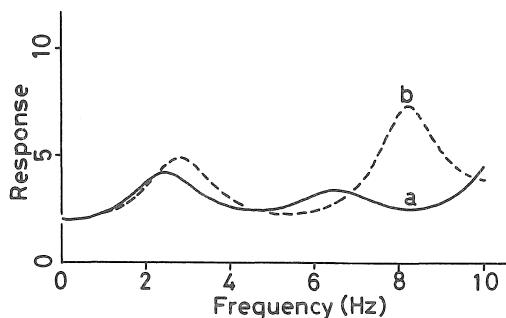


図4 日比津小学校の地盤増幅度曲線  
a : 実測Vs, ρを用いた場合  
b : 推定Vs, ρを用いた場合

や増幅度が大きく、周波数も大きい。実線には6.5Hz付近に第2ピークがあるのに対し、破線では第2ピークはさらに高い周波数の8.5Hz付近にあり一致していない。また破線の第2ピークは第1ピークの増幅度よりも大きい。

図4の例にみられるように一般に増幅度曲線にはいくつかのピークが存在する。従ってその地盤の増幅度を単純に決めることは危険であるが、ここではいくつかのピークのうち最も高いもの、即ち最大の増幅度をもってその地盤の増幅度とした。また、増幅度曲線にピークがみられないもの、即ち、曲線が単調に増加するようなものについては10 Hzでの増幅度をその地盤の増幅度としたが、そのような曲線の増幅度は小さく、数も少ない。こ

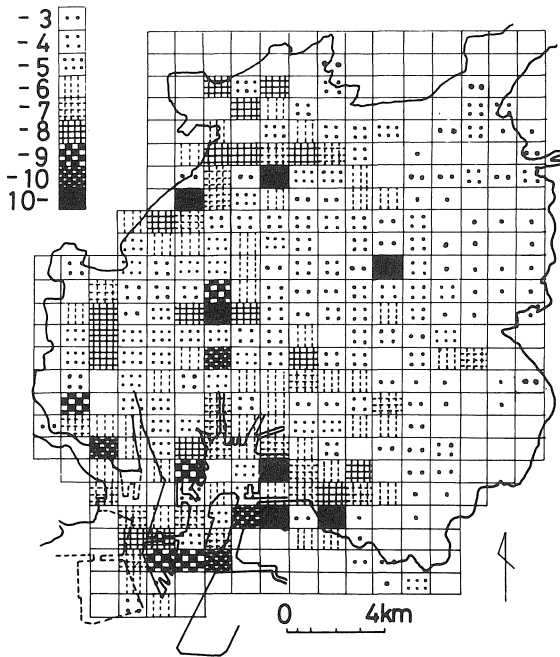


図5 最大増幅度分布

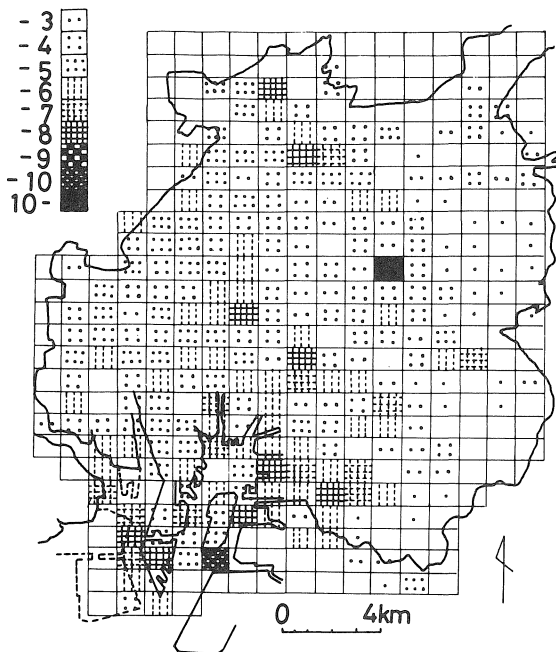


図6 第一次ピーク増幅度分布

のように一義的に増幅度を定めることは無理な点もあるが第一次的方法として用いた。地盤の粘性を考慮すれば高周波領域での増幅度は得られた値より小さくなること、実際の地震において数 Hz 程度の低周波数領域の波が被害をおよぼすこと等を頭において、増幅度曲線のピークのうち最もその周波数の小さいピークに注目しその増幅度を第一次ピーク増幅度として調べた。増幅度曲線にピークが唯一つしか存在しないような場合には（最大）増幅度と一次ピーク増幅度とは一致する。

各メッシュごとに得られた増幅度の分布を図5に示す。無印のメッシュはボーリングデータが無く計算ができなかったもの、一点印のメッシュは第三紀層、即ち今回設定した地震基盤が地表に直接露出しているために増幅度が2となるメッシュである。全体的には市の中心と東部地域で増幅度は小さく、市西部地域で大きい。細かく見れば市北西地域（中村区付近）および市南部臨海地域（港区付近）で増幅度6以上のメッシュが多くみられる。市中心やや右に増幅度10以上のメッシュがみられるが、その増幅度曲線にはピークが唯一つしかないメッシュである。図6は第1次ピーク増幅度の分布である。全体として増幅度が小さくなるが、市南部臨海地域では増幅度はあまり小さくならない。従って、増幅度が6以上のメッシュは南部臨海地域に集中的に分布するようになる。市北西地域および南部臨海地域では入力地震波は大きく増幅されるが、特に、前者では高周波数成分が、後者では低周波数成分が増幅されると考えられる。

名古屋市北西部庄内川流域や南部臨海地域では沖積層が厚く、S波速度も遅いことが知られている。また、著者らが測定した常時微動の解析結果<sup>7)</sup>によれば、これらの地域では微動卓越周期は0.5~1.0秒と長く、振幅も大きい。特に南部臨海地域ではこの傾向が強い。図5、図6にみられる増幅度分布の傾向とこれらの傾向が一致す

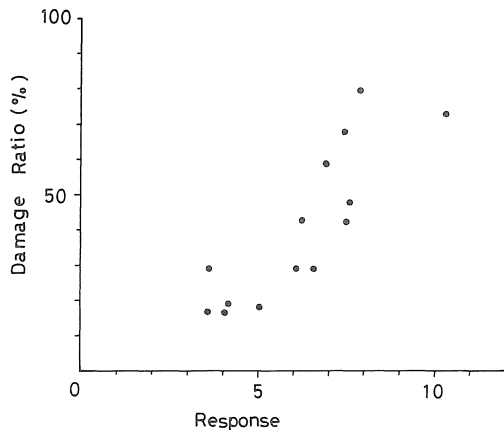


図7 濃尾地震の被害率と増幅度との関係

ることは興味深い。

4. 増幅度と地震被害率

S波増幅度と地震被害率<sup>8)</sup>を図7に示す。増幅度は現場測定で得たS波速度および密度を用いて計算した。また、被害率は濃尾地震における町村別住家被害率<sup>9)</sup>である。増幅度が6以上になると被害が増大する傾向がみられるが、東南海地震の場合にも同様の傾向<sup>8)</sup>がみ

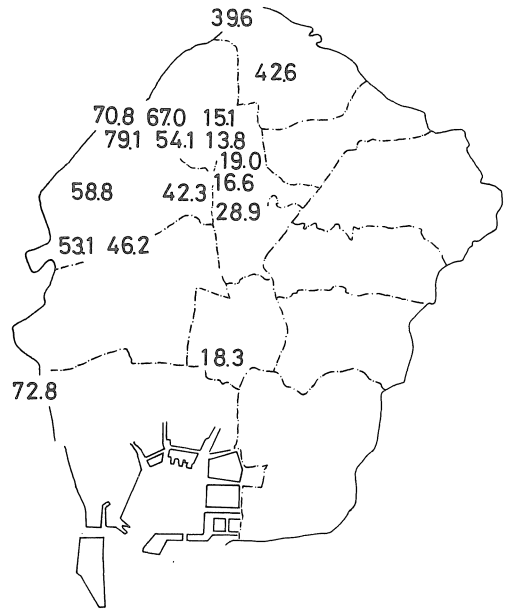


図8 濃尾地震（1891）の被害率

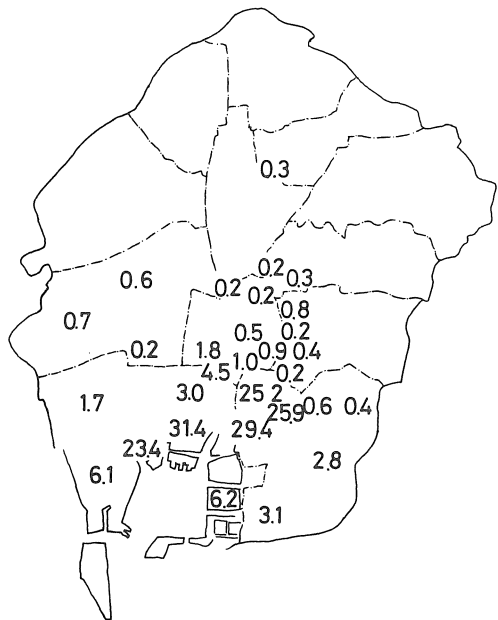


図9 東南海地震（1944）の被害率

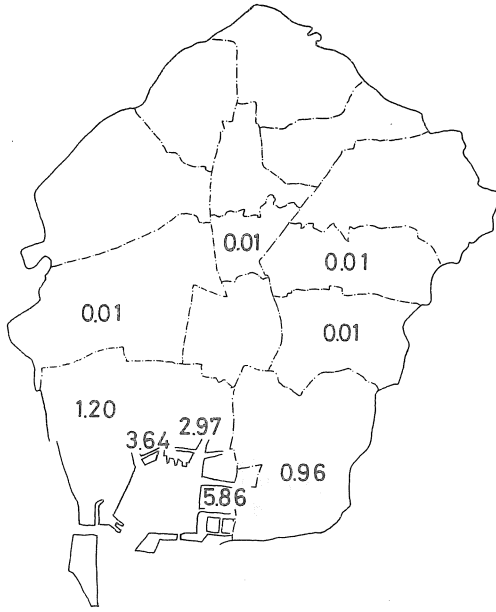


図10 三河地震（1945）の被害率

られた。

増幅度が6以上になると地震被害が大きくなることに注目するならば、図5あるいは図6に示した増幅度6以上のメッシュでは地震被害危険度は高いと考えられる。

図8, 9, 10に濃尾地震（1891）、東南海地震（1944）、三河地震（1945）における名古屋市の住家被害率分布<sup>9)</sup>を示す。濃尾地震では被害が市北西部に集中したが、これは震央に近かったためとも考えられるが、S波増幅度とも関係したと考えられる。南部地域で被害が小さかったのはもともと住家が少なかったためと考えられる。一方、東南海、三河地震においては南部港区一帯は被害が大きかった地域であったことは注目されなければならない。

## 5. 卓越周期と地震被害率

図11に卓越周期と濃尾地震における被害率との関係<sup>8)</sup>を示す。ここで卓越周期とは増幅度曲線において最大増幅度を与える周期のことである。顕著な傾向はみられないが、0.2~0.5秒に被害が集中していることがわかる。

## 6. まとめ

名古屋地盤35地点においてボーリング孔を掘削し、深度別のN値、土質区分（粘土、シルト、砂、砂礫）、地層年代（沖積層、洪積層）を調べると同時に、同孔を利用してP S 検層を実施、深度別のS波速度と密度をも求めた。

S波速度は四つの指標（深度、N値、土質区分、地層

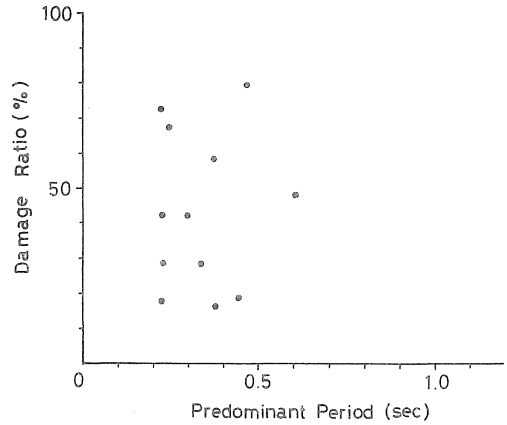


図11 濃尾地震被害率と卓越周期の関係

年代)で表わすことができると仮定し、約500の組合せデータを用いてその関係式を求めた。この関係式を用いれば四つの指標からS波速度を推定することができる。このようにして推定されたS波速度と実測のS波速度との間の相関係数は0.86であった。

密度についても同様に考え、関係を求めたところ相関係数は0.55となった。

名古屋地盤を一辺1kmの約400個のメッシュに区分し、各メッシュの地盤のS波速度と密度を上記関係式を用いて推定した。推定に必要な四つの指標に関するデータは名古屋地盤図に記載されているものから、最も適当なものを選んだ。

得られたS波速度、密度からHerrera and Rosenblueth（1965）の方法を用いてS波増幅度曲線を求めた。各メッシュについて最大増幅度および一次ピーク増幅度を求め、それらの分布を調べた。最大増幅度は市東部で小さく、西部で大きい、特に北西部、南部臨海部では6以上の大きな増幅度となることがわかった。一次ピーク増幅度は全体に小さくなるが、南部臨海部では依然大きいことがわかった。

濃尾地震時被害率との関係を調べたところ増幅度が大きくなると被害率も大きくなること、特に増幅度6以上で被害率が大きいことがわかった。このことから市北西部および南部臨海部で地震被害危険度が高いと予想されるが、東南海地震、三河地震の被害分布からもこのことは支持される。

最後に、プログラム作成にあたり多大なる御援助いただいた名古屋大学工学部多賀直恒助教授に深甚の謝意を表します。

計算には本学電子計算センターFACOM 230-25を利用したことを申しそえる。

## 参考文献

- (1)I.Herrera and E.Rosenblueth: Response Spectrum on Stratified Soil, Proc.III.W.C.E.E., Vol. 1, p.44-60, 1965.
- (2)飯田汲事, 正木和明: 名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告(第3報), 名古屋市防災会議地震対策専門委員会, p.1-86, 1976.
- (3)林知己夫: 数量化理論とその応用(V), 統計数理研究所彙報, 第8巻, p.149-151, 1961.
- (4) 太田裕, 後藤典俊: S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探鉱, Vol. 29, No.4, p.31-41, 1976.
- (5)名古屋地盤図: コロナ社
- (6)飯田汲事, 正木和明, 楓重彦: 名古屋市内地盤各層中のS波速度測定調査報告(第4報), p.1-35, 1977.
- (7)飯田汲事, 正木和明, 谷口仁士: 常時微動測定による名古屋地盤の振動特性と震害について, 愛知工業大学研究報告, Vol.12B, p.127~134, 1977.
- (8)飯田汲事, 正木和明, 坪井利弘: S波多重反射理論による名古屋地盤の地震応答計算, 愛知工業大学研究報告, Vol.13B, p.181-190, 1978.
- (9)飯田汲事: 名古屋市における既往の地震とその災害, 名古屋市防災会議地震対策専門委員会, p.1-78, 1974.
- (10)飯田汲事, 正木和明, 楓重彦: 名古屋地盤の振動特性に関する研究, 愛知工業大学研究報告, Vol. 13B, p.191-200, 1978.