

埋設管の震害予測のためのマイクロゾーニングについて

後 藤 尚 男・杉 戸 真 太

亀 田 弘 行・磯 田 厚 志

MICROZONING FOR SEISMIC RISK ANALYSIS OF BURIED LIFELINE SYSTEMS

By Hisao GOTO, Masata SUGITO, Hiroyuki KAMEDA
and Atsushi ISODA

Synopsis

A method for microzoning earthquake motion intensities and ground strain is developed that can be used for assessment of earthquake damage on buried pipeline systems. A simple method for ground strain estimation is proposed after the discussion on influence of site condition on peak velocity, ground strain, and apparent propagation velocity, using the prediction model of earthquake motion, and ground strain. The method is applied for Kyoto City for three hypothetical earthquake using 674 of boring data. Numerical results are discussed regarding the value of apparent propagation velocity, distribution of earthquake motion intensities, and that of ground strain in Kyoto City.

1. 序 論

水道・ガス等の供給システムはその多くの部分が埋設管より成り、地形・地質の変化する広い地域にわたって敷設されていることが多い。このような埋設パイプラインシステムの震害予測を行うには埋設管の震害に影響する地震外力を選定し、システムがカバーする地域全体にわたってその外力項に関する地盤のマイクロゾーニングを行うことが必要である。ライフライン系の地震時信頼度評価を前提としてマイクロゾーニングを行った研究に、Toki and Sato¹⁾、Shinozuka, Takada, and Ishikawa²⁾、その他がある。Toki and Sato¹⁾は、強震記録の統計的解析により得られた加速度応答スペクトルを基盤に入力して表層地盤の固有周期より速度応答スペクトルを求め、これを外力項とする手法を提案して大阪地盤に適用した。また、Shinozukaら²⁾は、震度階に対応する外力項を設定し Los Angeles 市での解析を行った。これらの研究では、S波速度や液化化危険度に着目して表層の地盤条件を3～4段階に分類するなど地盤条件の取り扱いに関して種々の努力がなされているが、都市的規模の広がりや有する地盤は一般に多様に変化していることが多く、このような場合表層の地盤条件は連続量により定量的に表現することが望ましいと考えられる。本研究は、埋設管の地震時挙動を支配する外力の一つである地盤ひずみを取り上げ、地盤ひずみを推定するうえで有効な地盤条件の表現法として N 値分布および関連する地盤情報を用いた連続量による地盤パラメータを定義し、マイクロゾーニングに応用する手法について検討したものである。

はじめに、地震動予測における地盤条件として、 N 値を用いた定量的な地盤条件の評価法を示し、強震記録より得られた地動加速度、速度、変位のアテニュエーションモデルに提案した地盤パラメータを導入する方法を論ずる。つぎに、種々の地盤モデルを設定し、非定常地震動の予測モデル³⁾を用いた地震動表面波による地盤ひずみの推定法⁴⁾を用いて地盤条件と地盤ひずみ、地盤速度等との関係を検討し、上記の結果と組み合わせ地盤ひずみを簡易的に推定するための地盤パラメータを定義する。さらに、京都市地盤をとり上

げ、定義した地盤パラメータを用いて想定地震による地動加速度、速度、および地盤ひずみに関するマイクロゾーニングを行う方法を示す。

2. N 値を用いた地盤条件の評価法⁵⁾

本章では、通常のボーリングを伴う地盤調査でほとんどの場合に測定される N 値を用いて地盤の軟弱さの指標を定義し、地盤条件を表す連続量による地盤パラメータとして地震動最大加速度・速度のアテニュエーションモデルに導入する手法を示す。

2.1 N 値分布を用いた地盤の軟弱さの表現

一般に、地表付近の地盤が軟弱なほど地表面での地盤震動が大きくなることは、過去の多くの震害例からみて明らかである。したがって、多様な地盤条件より成るある地域の地盤震動の激しさの分布を推定するには、地盤の軟弱さを表す連続量による地盤パラメータが必要である。そこで、地盤の軟弱さの程度を N 値を用いて次式のように定義し、地震動予測における地盤パラメータとしての有効性について考察する。

$$S_i = \int_0^{d_i} \exp \{-\gamma_1 \cdot N(x)\} \exp \{-\gamma_2 \cdot x\} dx \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $N(x)$ は深さ $x(m)$ における N 値、 $d_i(m)$ は N 値が得られているところまでの深さ、 γ_1, γ_2 は正の定数である。ただし、通常のボーリング調査における N 値の測定は、極端に軟かい地盤を除いて N 値が50程度の深さまで行われることが多い。したがって、 d_i は N 値がそれ以深で50程度以上となるところまでの深さと考えてもよいであろう。式(1)で表される S_i は N 値が小さく地盤が軟弱なほど、そして地表に近い部分が軟弱なほど大きな値となる。また、土質による N 値の絶対値のもつ意味の違い⁶⁾を考慮し、式(1)を用いるにあたり Table 1 の補正係数⁵⁾により各土質の N を補正してから S_i を算定することとした。

Table 1. Correction Factor ζ_N for N -value in Calculation of S_i .

geomaterial	sand	clay, silt	gravel
ζ_N	1.0	1.2	0.8

2.2 最大地動予測における地盤の軟弱さの指標 S_i と地盤の軟弱度指数 S_e

Table 2 に、わが国で得られた主要な強震記録より得られた最大加速度・速度・変位のアテニュエーション式⁵⁾を示す。ここで用いたデータは、1978年宮城県沖地震(18成分)および伊豆半島沖地震(6成分)を含む28地震による84成分であり、これらは加速度記録を補正⁷⁾した補正加速度波形より得られた最大加速度・速度・変位である。また、最大加速度は40 gal 程度以上のもののみであり、最大加速度の度数分布を

Table 2. Attenuation Equations of Earthquake Motions.

	attenuation equation	coefficient of variation δ_u
peak acceleration	$\bar{A} = 202 \times 10^{0.172M} / (D+30)^{0.666}$	0.578
peak velocity	$\bar{V} = 1.17 \times 10^{0.232M} / (D+30)^{0.300}$	0.655
peak displacement	$\bar{D} = 0.0288 \times 10^{0.356M} / (D+30)^{0.219}$	0.685

$$\left(\begin{array}{l} \text{attenuation} \\ \text{equations:} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \bar{A} \\ \bar{V} \\ \bar{D} \end{array} \right\} = b_0 \cdot 10^{b_1 M} / (D+30)^{b_2} \right. \left. \begin{array}{l} A ; \text{ peak acceleration (cm/sec}^2\text{)} \\ V ; \text{ peak velocity (cm/sec)} \\ D ; \text{ peak displacement (cm)} \\ M ; \text{ magnitude} \\ d ; \text{ epicentral distance (km)} \end{array} \right)$$

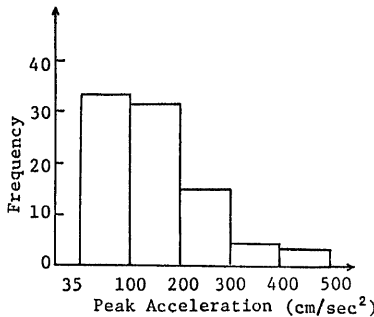


Fig. 1. Histogram of Peak Acceleration of Earthquake Data Used for Regression Analysis.

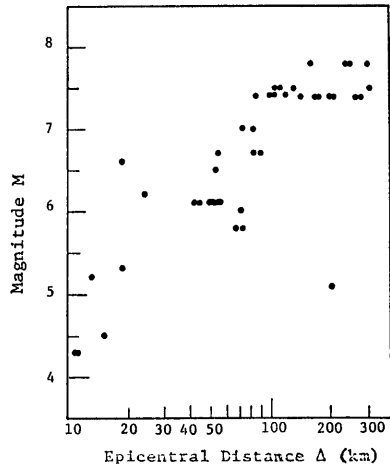


Fig. 2. Scattergram of Magnitude and Epicentral Distance of Earthquake Data Used for Regression Analysis.

Fig. 1 に、マグニチュード (M) および 震央距離 ($d(km)$) の分布を Fig. 2 に示した。

さて、ここで示した最大地動のアテニュエーション式とデータが得られた強震観測地点の地盤資料を用いて、各最大地動に最適な地盤の軟弱さの指標を求める。

アテニュエーション式まわりのデータのばらつき U を、表層の地盤条件による最大地動の平均的な増減特性 C とそれ以外の要因 U_s とに分けることができる。すなわち、

$$Y = U \cdot \bar{Y} = U_s \cdot C(S_n) \cdot \bar{Y} \quad (2)$$

ここに、 S_n は以下に述べるように、 S_i の関数として定義される地盤の軟弱さの指標である。地盤条件による最大地動の増減率とでも言うべき C の常用対数を次式に示すように S_i の一次関数と仮定し、式(3)まわりのデータのばらつきが最小となるように係数 $\gamma_1, \gamma_2, a_0, a_1$ を決定する。

$$\log C = a_0 + a_1 S_i \quad (3)$$

このようにして、最大加速度、速度、変位に対する表層の地盤条件として有効な地盤パラメータが得られるが、同じ地盤であっても最大加速度、速度、変位に対して S_i の値が大きく異なる。したがって扱いを便利にするため S_i を正規化する。すなわち、 $N(x)=0$ が半無限に続く地盤で $S_n=1, C=1$ のとき $S_n=0$ となるように S_n を定義する。このとき、

$$C(S_n) = 10^{(a_1/\gamma_2 + a_0)S_n} = C_n^2 \quad (4)$$

$$S_n = (S_i - \beta) / (1/\gamma_2 - \beta) \quad (5)$$

ただし、 $\beta = -a_0/a_1$ であり β は $C=1$ となるときの S_i の値である。また、 $C_n = 10^{(a_1/\gamma_2 + a_0)}$ は地盤の軟弱さによる最大地動の補正係数 C の最大値である。Table 3 に、式(4)、(5)中のパラメータの値および式(2)の U_s の変動係数を示し、Figs. 3, 4, 5 には、 S_n と回帰式からのデータの変動 $\log U$ との関係を示した。ここに示した地点数は16地点であり、対象となる強震記録は58成分である。観測地点の地盤は、一般的な沖積および洪積地盤であり、岩盤や非常に軟弱な地盤は含まれていない。最大加速度 (Fig. 3) および最大速度 (Fig. 4) においては、地盤パラメータ S_{na}, S_{nv} (添字の a, v, d はそれぞれ加速度、速度、変位を表す) と $\log U$ とには比較的相関があり、地盤が軟弱なほど (S_n が大きいほど) 平均的に $\log U$ が大きいことを示している。

Table 3. Parameters for Evaluation of the Site Parameter S_a .

	γ_1	γ_2	β	C_m	$\delta_{0.5}$
peak acceleration	0.015	0.194	3.761	2.238	0.499
peak velocity	0.044	0.134	3.580	2.898	0.539
peak displacement	0.030	0.200	3.186	1.832	0.665

Figs. 3, 4, 5 中の実線は C と S_a , S_v , S_d との関係を示すものである。これらの結果より、地盤の N 値分布から S_a , S_v , S_d が得られると、それより C_a , C_v , C_d が与えられ M , d のみから予測される最大加速度、速度、変位に対してその地点で平均的にどの程度増減するかを知ることができる。

また、Table 2, 3 の結果より、 N 値柱状図が与えられた場合の最大地動予測における不確定性の減少を変動係数と比較すると、最大加速度で約14%、最大速度で約18%、最大変位で約3%である。最大加速度、最大速度に比べて最大変位は比較的長周期成分の振幅強度によって決まるが、このような周期成分には通常のボーリング資料が得られる深さ（数10m程度）よりかなり深い部分の地盤条件が反映されと考えられる。したがって、ここで定義した S_a のように10～数10m程度の範囲の地盤条件が反映されるパラメータでは、最大変位に関して上記のような結果が得られたことはむしろ当然とも言えよう。

さて、式(4)の $C(S_a)$ は、 M , d から推定される地震動強度を地盤条件により補正するための係数であり、 C あるいは S_a により各地盤の相対的評価ができるが、Figs. 3～5 にみられるように同じ地盤でも対象とす

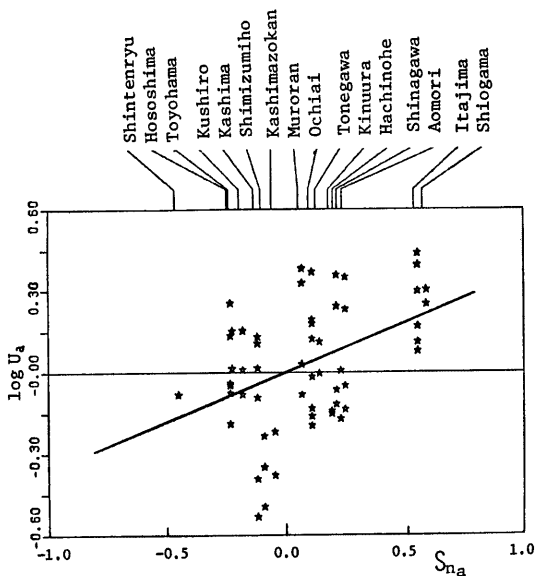


Fig. 3. Influence of Site Parameter S_a on Variation of Peak Acceleration ($\gamma_1=0.015$, $\gamma_2=0.194$, $\beta=3.761$, $C_m=2.238$).

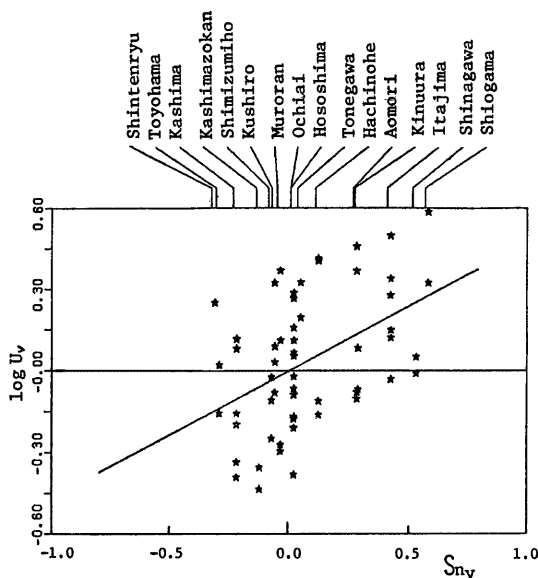


Fig. 4. Influence of Site Parameter S_{nv} on Variation of Peak Velocity ($r_1=0.044$, $r_2=0.134$, $\beta=3.580$, $C_m=2.898$).

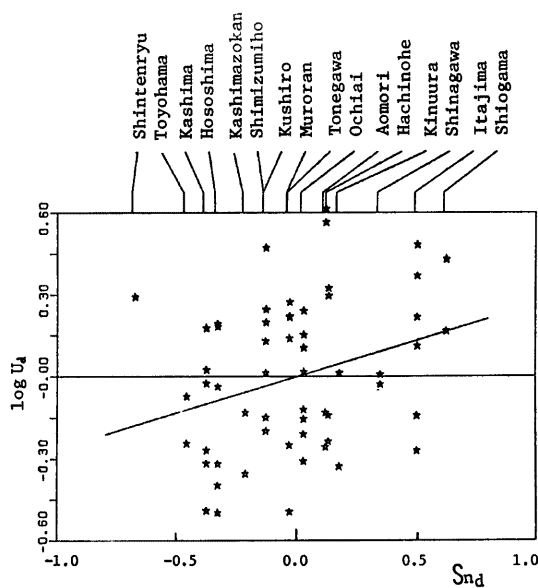


Fig. 5. Influence of Site Parameter S_{nd} on Variation of Peak Displacement ($r_1=0.030$, $r_2=0.200$, $\beta=3.186$, $C_m=1.832$).

る最大地動により C , S_a の値は多少異なっている。したがって、各最大地動（とくに表層の地盤条件の影響を比較的大きく受ける最大加速度、最大速度）の S_a の特性を包含した地盤パラメータを定義し、地盤震動の激しさからみた地盤の軟弱度指数として提案する。Fig. 6 に見られるように各地点における S_{ns} , S_{nv} には強い相関があるので、ここでは簡単に両者の平均値として次式のように地盤の軟弱度指数 S_o を定義する。

$$S_o = \frac{S_{ns} + S_{nv}}{2} \dots\dots\dots (6)$$

各強震観測地点での地盤パラメータ S_{ns} , S_{nv} , S_o を Table 4 に示した。

このようにして定義された S_{ns} , S_{nv} (または C , C_v), S_o は表層付近の地盤条件を N 値を用いて連続量で表した地盤パラメータであり、地盤震動の激しさが比較的表層付近の地盤条件に大きく影響されることを考慮すると、地盤のマイクロゾーニングを行ううえで有効なパラメータであると考えられる。

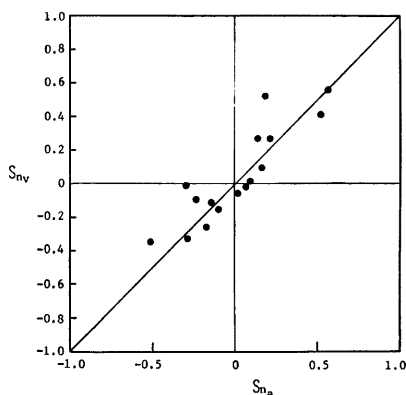


Fig. 6. Relation between Site Parameters S_{ns} and S_{nv}

3. 地震時地盤ひずみの簡易推定法

本章では、既に提案した地震時地盤ひずみの推定法⁴⁾を用いて、各地盤条件に対する地盤ひずみの特性を検討するとともに、地盤ひずみ推定のための地盤パラメータを定義し、埋設管の震害予測に直接利用できる指標として提案する。

Table 4. Site Parameters S_{ns} , S_{nv} , S_o for Observation Stations of Strong-Motion Earthquake.

Site	S_{ns}	S_{nv}	S_o
Kashima (Ibaragi Pref.)	-0.142	-0.239	-0.191
Muroran (Hokkaido)	0.049	-0.053	-0.002
Hachinohe (Aomori Pref.)	0.196	0.109	0.153
Kushiro (Hokkaido)	-0.204	-0.077	-0.141
Hososhima (Miyazaki Pref.)	-0.255	0.004	-0.126
Aomori (Aomori Pref.)	0.234	0.271	0.253
Shimizuho (Shizuoka Pref.)	-0.112	-0.092	-0.102
Shinagawa (Tokyo)	0.214	0.522	0.368
Kinuura (Aichi Pref.)	0.177	0.276	0.227
Itajima (Ehime Pref.)	0.541	0.415	0.478
Toyohama (Aichi Pref.)	-0.248	-0.312	0.280
Tonegawa (Ibaragi Pref.)	0.123	0.033	0.078
Ochiai (Nagano Pref.)	0.092	0.004	0.048
Shintenryugawa (Shizuoka Pref.)	-0.472	-0.331	-0.402
Kashimazokan (Ibaragi Pref.)	-0.067	-0.143	-0.105
Shiogama (Miyagi Pref.)	0.578	0.575	0.577

3.1 地盤条件による地震時地盤ひずみの特性

先の研究⁴⁾では、非定常地震動の予測モデル³⁾と表面波伝播に伴う地盤の相対運動による地盤ひずみの算出法とを組み合わせ、想定地震による着目地点での地盤ひずみを推定する手法を提案した。ここでは、種々の地盤モデルを設定し、地盤条件による地震時地盤ひずみの特性を上記の手法を用いて検討する。

一般に、わが国の都市の存在する平野部の表層では沖積層あるいは洪積層が卓越し、岩盤や硬質砂礫層など主として第三紀以前の地層はその下に存在する例が多い。このことを考慮して、表層の軟弱さや層厚、および岩盤に至るまでの中間層（たとえば硬質砂礫層等）の存在の地盤ひずみに及ぼす影響をみるため Fig.7 に示す15の地盤モデルを設定した。地盤 G-11~G-15は、地表面下50mまで沖積あるいは洪積層に相当す

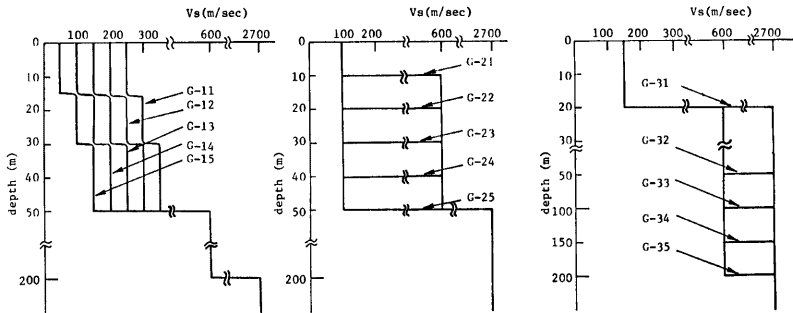


Fig. 7. Typical Soil Layer Models Used for Analysis.

Table 5. Ground Strain ϵ_{max} , Apparent Propagation Velocity c , Peak Velocity V_{max} , and Peak Acceleration A_{max} ($M=6.8$, $J=15\text{km}$).

	$\epsilon_{max} \times 10^{-4}$ ($D=5\text{m}$)	$\epsilon_{max} \times 10^{-4}$ ($D=100\text{m}$)	c ($D=5\text{m}$) (m/sec)	c ($D=100\text{m}$) (m/sec)	V_{max} (kine)	A_{max} (gal)
G-11	4.8	1.6	280	830	13.3	190.2
12	10.7	2.1	170	870	18.7	229.7
13	17.7	3.6	170	850	30.3	301.1
14	32.8	6.2	120	650	40.3	343.0
15	149.4	9.8	40	530	52.4	371.3
G-21	12.4	2.5	210	1060	26.1	246.5
22	24.3	6.1	190	750	45.9	318.8
23	31.5	7.1	140	710	44.5	320.5
24	40.9	8.2	90	470	38.6	362.8
25	46.6	7.1	80	510	36.2	329.8
G-31	9.1	1.7	250	1320	23.1	292.3
32	11.8	1.7	190	1360	22.7	392.6
33	11.8	2.3	200	1050	23.8	271.2
34	13.7	2.6	210	1080	28.1	332.9
35	14.8	3.3	190	870	28.8	319.9

(D : separation distance)

る地層を、その地下200mまでに比較的堅固な S 波速度 $V_s=600$ m/sec 程度の中間層を、さらにそれ以深に岩盤 ($V_s=2700$ m/sec) を設定したものである。また、地盤 **G-21~G-25** は、地表面下50mまでにおいて軟弱層 ($V_s=100$ m/sec) を10~50mに設定したものであり、さらに地盤 **G-31~G-35** は、地表面下20mまで軟弱層、それ以深に中間層 ($V_s=600$ m/sec) を0~180mの範囲で設定したものである。これらの地盤モデルはそれぞれ次のような検討を行うために設定した。

地盤 **G-11~G-15** : ごく表層の地盤の軟弱さが地盤ひずみに及ぼす影響

地盤 **G-21~G-25** : 表層の軟弱層厚が地盤ひずみに及ぼす影響

地盤 **G-31~G-35** : 比較的堅固な中間層 ($V_s=600$ m/sec 程度) の厚さが地盤ひずみに及ぼす影響

さて、これら15の地盤に対し、想定地震による表面波伝播に伴う地盤ひずみ等を算出した。ただし、ここで対象とした表面波は Rayleigh 波であり、その基準モードのみを考慮して地盤の相対運動を求め、それより地盤ひずみを算出した。想定した地震はマグニチュード $M=6.8$ 震央距離 $d=15$ km である。Table 5 に、各地盤での最大加速度 A_{max} 、最大速度 V_{max} 、最大平均ひずみ ε_{max} 、および地震波のみかけの伝播速度 $c (=V_{max}/\varepsilon_{max})$ を示した。ただし、 ε_{max} および c は、地盤の相対運動算定における距離 D (相関距離) を

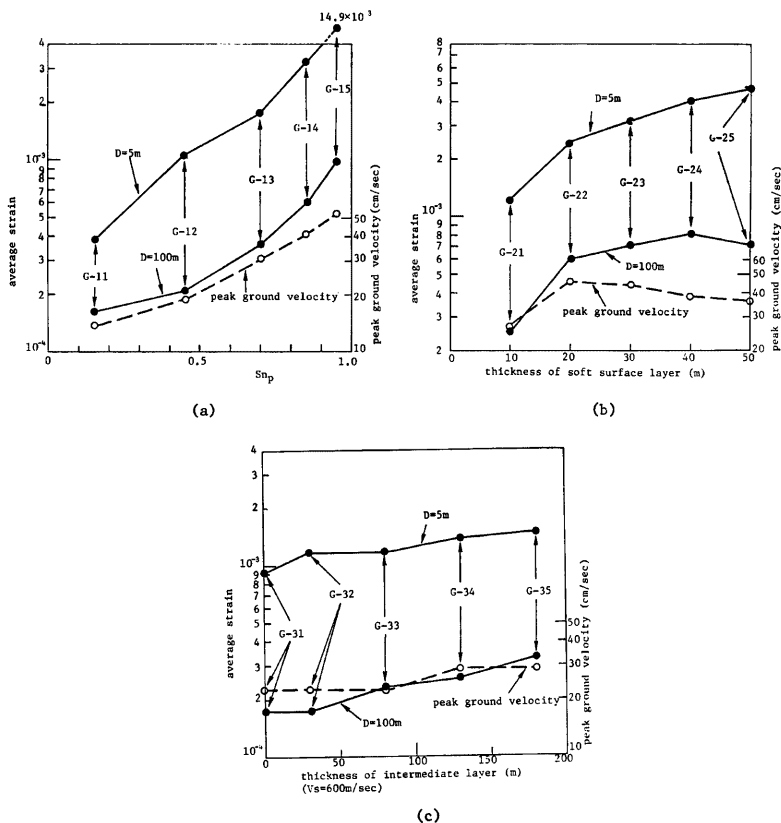


Fig. 8. Influence of Site Conditions on Maximum Strain and Peak Velocity.

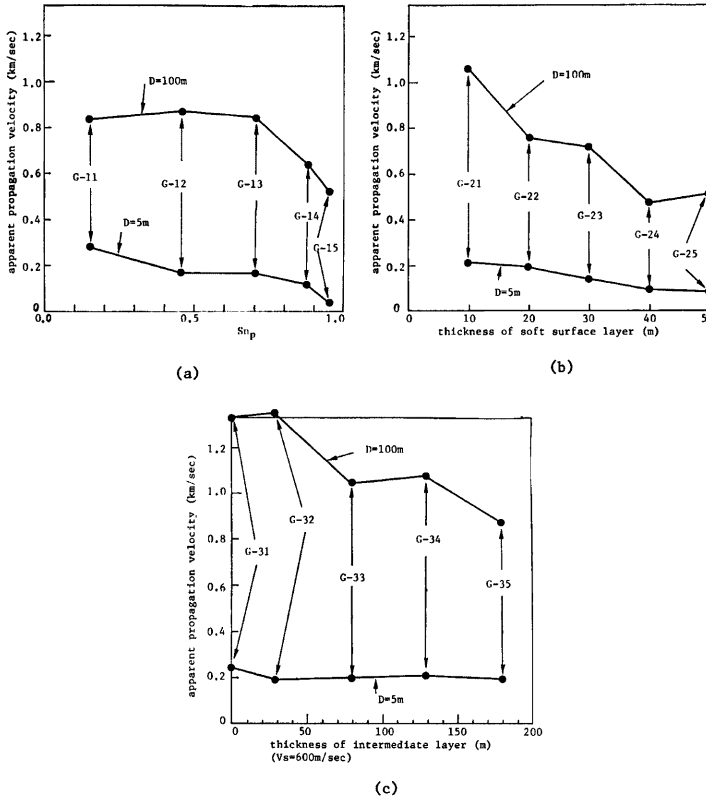


Fig. 9. Influence of Site Conditions on Apparent Propagation Velocity of Earthquake Surface Wave.

5 mおよび100 mとした場合の値である。相関距離 $D=5\text{m}$ ではいわゆる局部ひずみを対象としており埋設管との関連では管体自身の破壊を検討する基準と考え、また $D=100\text{m}$ では平均ひずみは継手構造管やマンホールなどの関連構造物間の相対運動を検討する際の基準と考えられる。また、Fig. 8, 9 に Table 5 の値を示した。各図(a)は地盤 G-11~15 について示したもので、横軸には地震動予測モデル³⁾で考慮した表層の軟弱さを表すパラメータ S_p ⁸⁾ (地震動加速度パワーに関して地盤条件の軟弱さを表す指標) をとり、各図(b) (地盤 G-21~25) の横軸は表層の軟弱層厚、各図(c) (地盤 G-31~35) の横軸は比較的堅固な中間層 ($V_s=600\text{m/sec}$) の厚さである。

Fig. 8, 9 の結果から以下のことが言えよう。

- 1) 地盤最大ひずみは表層表面付近の軟弱さに大きく影響を受け (G-11~15) 表層部が軟弱なほどひずみは大きい (G-21~25, G-14, 15)。
- 2) 表層の軟弱層厚は、みかけの伝播速度 $c(=V_{max}/\xi_{max})$ に比較的大きく影響する (G-21~25)。また、G-11~15 の結果より、表層の S 波速度が $V_s=100\sim150\text{m/sec}$ 程度以上では同じ表層厚の場合 c の値が大

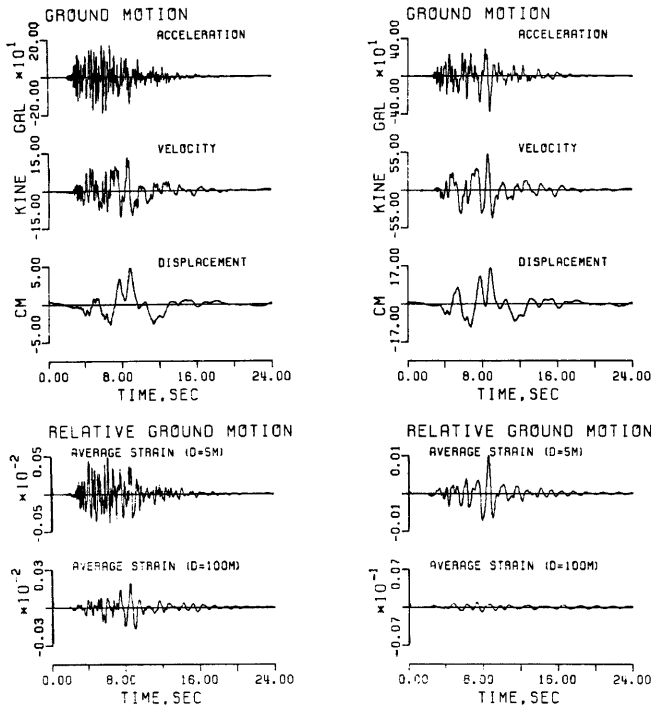


Fig. 10. Simulated Earthquake Motions and Relative Ground Strain at Site G-11 and G-15 ($M=6.8$, $\Delta=15\text{km}$).

きく変化していないことがわかる (G-11~13)。

3) 中間層 ($V_s=600\text{m/sec}$ 程度の層) の存在は最大ひずみやみかけの伝播速度にあまり影響せず、むしろ岩盤 ($V_s=2,700\text{m/sec}$ 程度) が地表面下数10m程度以下になると相関距離 $D=100\text{m}$ でのみかけの伝播速度が急に大きくなる傾向にある (G-31~35)。

4) みかけの伝播速度は表層および表層以深の地盤条件により複雑に変化するが、相関距離 $D=5\text{m}$ ではおおむね $c=100\sim200\text{m/sec}$ 程度、 $D=100\text{m}$ で $c=600\sim1400\text{m/sec}$ 程度である。また、Fig. 10 に、地盤 G-11, G-15 の地震動波形 (加速度・速度・変位) および $D=5\text{m}, 100\text{m}$ における平均ひずみの波形を示した。地盤 G-15 は表層部が軟弱であり地震動が大きく地盤ひずみも大きい。各々のひずみ波形を比較すると、軟弱な地盤である G-15 では卓越周期が $D=5\text{m}$ および 100m でともに長く、堅い地盤である G-11 の場合、 $D=5\text{m}$ でとくに高振動数成分が卓越しひずみレベルが小さい。

さて、ここで得られた結果から、地震時地盤ひずみは表層地盤の軟弱さに大きく依存するとともに、表層厚等の影響を受け、さらに、表層厚は表面波のみかけ速度 $c(=V_{max}/\varepsilon_{max})$ に大きく影響することが明らかとなった。したがって、次節ではこのような結果を踏まえて地盤ひずみを簡易的に推定するための地盤パラメータを定義し、マイクロゾーニングに応用するための手法を示す。

3.2 地盤ひずみ推定のための地盤パラメータ I_s

前節で用いた地盤ひずみ推定の手法⁴⁾は、想定された M, D および地盤条件より非定常地震動を算出し、一方で地盤条件より表面波の分散曲線を求めて、各相関距離 D における地盤の相対運動を算出するという比較的複雑な過程を経るものであった。したがって、ある広がりをもつ地域で地盤ひずみの分布を求めて埋設管の震害予測を行う場合、上記の手法をそのまま適用するには非常に多くの計算時間を必要とし、また地域全体にわたって深い地盤の資料を得ることも現実的には困難である。そこで地盤の最大速度を前章で示した方法で推定し、それより簡易的に地盤ひずみを推定するためのパラメータを定義する。

地盤ひずみ ε と速度振幅 V との関係を近似的に表す式、

$$\varepsilon = \frac{V}{c} \dots\dots\dots (7)$$

において、みかけの伝播速度 c は前節でみたように表層の厚さ等に影響されるパラメータであった。このような地盤条件はある地域において表層の軟弱さほどには変化しないものと考えられる。したがって、まず対象とする地域の特徴的な数ヶ所の地点を選び、前節で用いた手法によりそれらの地盤での c_i を求め、つぎに他の地点については、地質図等により数値計算で対象としたどの地点の地質構成に近いかを調べてその c_i を与える。こうして地域全体の c を概略的に知ることができる。このとき、次式のように各地点での地盤ひずみ推定のためのパラメータ I_s を定義できる。

$$\varepsilon = \frac{C_p \cdot V(M, D)}{100 \times C_i} = \frac{C_p}{C_i} \cdot \frac{V(M, D)}{100 \times C_m} = I_s \cdot \frac{V(M, D)}{100 \times C_m} \dots\dots\dots (8)$$

ここに、 $V(M, D) = M, D$ からアテニュエーション式により得られる最大速度の期待値 (cm/sec)、 C_p = 表層の地盤条件による最大速度の補正係数、 c_i = 着目地点のみかけの伝播速度 (m/sec)、 c_m = 対象とする地域のみかけの伝播速度の代表値 (m/sec)、 C_p = 着目地点のみかけの伝播速度をその地域の代表値に対して補正する係数で $c_i = C_p \cdot c_m$ で表わされる。また、 $I_s = C_p / C_i$ である。したがって、地盤パラメータ I_s はごく表層付近の軟弱さの程度および表層厚等の情報を含んだものであり、 M, D から推定されるある地域での平均的な地盤ひずみに対して着目地点でどの程度増減した値になるかを表わす量である。

以下に、上記のパラメータ I_s を用いて地盤ひずみを対象としたマイクロゾーニングを行う手順を示す。

- 1) 対象とする地域のボーリング資料に基づいて、最大速度の地盤条件による補正係数 C_p の分布図を作成する。
- 2) 対象とする地域のなかで特徴的な地点（たとえば沖積平野、洪積台地、山地等）のうち地盤深部のデータが得られているかあるいは地質図等よりある程度推定できる地点をそれぞれ数ヶ所選び、前節で用いた手法により各地盤でのみかけの伝播速度 c_i を求める。
- 3) ボーリング資料、地質図等により各地点が2)で選んだどの地盤に相当するかを決め、対象地域のみかけの伝播速度の代表値 c_m に対する補正係数 C_p を求め1)の結果と結合して地盤パラメータ I_s の分布図を作成する。
- 4) 想定地震による各地点での（地盤条件を考慮しない）最大速度の期待値 $V(M, D)$ を c_m で除した値に対して、3)で得られたパラメータ I_s を乗ずることにより地域全体の地盤ひずみの期待値を得る。

さて、このようにして推定される地盤ひずみのもつ不確定性は、その実測データがほとんどないことから厳密には得られないが、地盤ひずみが最大速度振幅にほぼ比例するものと考えれば Table 3 中の最大速度の地盤条件を考慮した場合の変動係数 δ_{ν_s} が一応の目安となるであろう。このばらつきは依然として大きい⁹⁾ので、一つの地震に対するある地域の各地点での地震動の強さは比較的強い相関をもつものと考えられる⁹⁾ので、ここで定義した I_s を用いることにより対象地域の地盤ひずみの相対的な分布状況を知ることには十分可能であろう。

4. 京都市地盤のマイクロゾーニング

本章では、京都市地盤を例にとり2章および3章で示した地盤パラメータを用いて地盤のマイクロゾーニングを実施し、想定地震に対する各地点の地動加速度・速度・地盤ひずみを推定する。

4.1 京都市地盤の概要と想定地震

2, 3章で定義した地盤パラメータを用いてマイクロゾーニングを行うには、対象とする地域のボーリング資料や比較的深い地盤の様子を推定できる地質図等が必要である。京都市においては、小堀¹⁰⁾によりまとめられた約6000本のボーリング資料¹¹⁾および地域的な地質分布を示した地質図¹²⁾(Fig. 11)があり、これを用いて想定地震に対するマイクロゾーニングを行った。これらの資料によると、京都市域地盤の概略は以下のようなものである。

京都市域の地形は、(1)北部及び東部に発達する山地、(2)西部に発達する丘陵地、および(3)これらに囲まれて京都盆地を形成する沖積低地、に分類できる。そして、それぞれ古生層、大阪層群(下部洪積層)、沖積層が卓越している。沖積低地北部では鴨川が扇状地を形成し、この扇状地堆積物である砂レキ層(上部洪積層)は10～数10m程度あり最大で70m程度にまで発達している。また、南部では、鴨川、桂川、宇治川、木

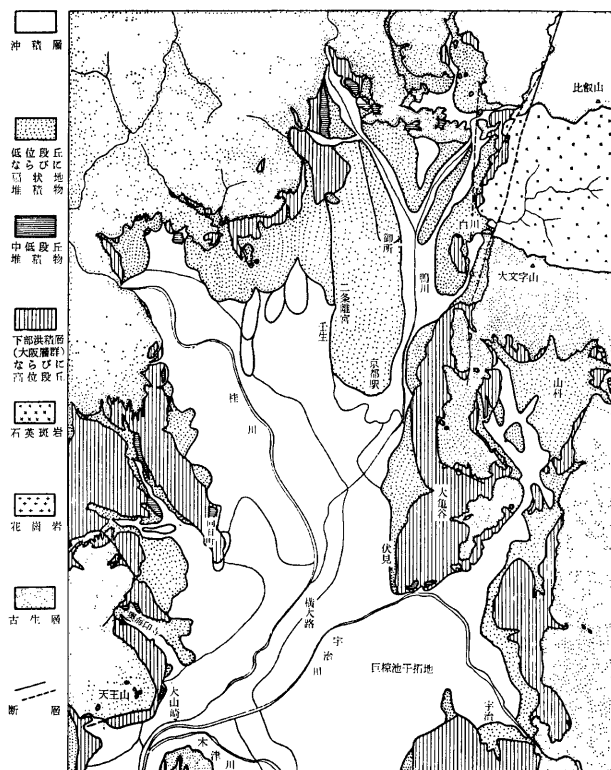


Fig. 11. Geology of Kyoto¹²⁾.

津川の河川によって推積した沖積粘土層および軟弱な砂層が卓越している。

さて、ここで想定した地震の規模（マグニチュード）と震央位置を Fig. 12 に示した。これらは、過去の歴史地震の資料より、京都市に被害をもたらす地震として小沢¹³⁾により提示されたものである。このうち、地震（A）、（B）はいわゆる直下型、地震（C）は近地型地震である。

4.2 最大地動予測のためのマイクロゾーニング

本節では、最大地動のアテニュエーション式⁵⁾と2章で示した地盤パラメータ C_u , C_s を用いて想定地震に対する最大加速度、最大速度の分布図を作成する。ただし、地震（A）、（B）のような直下型地震のデータはアテニュエーション式を得る際のデータに含まれておらず、このように震央距離のきわめて小さい場合の最大地動の推定には“震央域”を考慮したアテニュエーション特性を用いる必要がある。これは、ある程度以上震央に近い地点では平均的に地震動最大加速度は一定であると指摘する研究¹⁴⁾もあり、重要な検討項目である。ここでは、村松¹⁵⁾による震度VI以上の強震域面積 A_{VI} (cm²) とマグニチュードとの関係式

$$\log A_{VI} = 3.34 + 1.36M \quad \dots\dots\dots (9)$$

を参考にして地震動強動が一定となる震央距離 d_0 (km)、および d_0 を考慮した最大加速度・速度のアテニュエーション特性を以下のように決める。

- 1) 式(9)における強震域 A_{VI} を円と仮定しその半径 r_{VI} (km) を与える式

$$\log r_{VI} = -3.58 + 0.68M \quad \dots\dots\dots (10)$$

を得る。

- 2) ここで想定した地震のマグニチュードの範囲 ($M=6.4 \sim 7.5$) で式(10)による強震域半径 r_{VI} を求め、これを震央距離とする最大加速度の期

待値を Table 2 のアテニュエーション式により求める (Fig. 13)。

- 3) Fig. 13 における最大加速度の平均値 (=275 gal) を強震域における平均的な値とし、この値を用いて各マグニチュードにおける強震域を与える震央距離 d_0 (km) を再び Table 2 のアテニュエーション式より算定する。

- 4) 最大速度の上限値は各マグニチュードにおける d_0 より Table 2 のアテニュエーション式を用いて算定する。

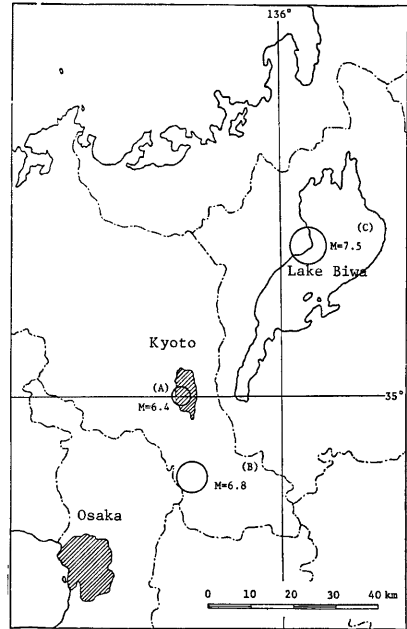


Fig. 12. Magnitude and Epicenter of Hypothetical Earthquakes.

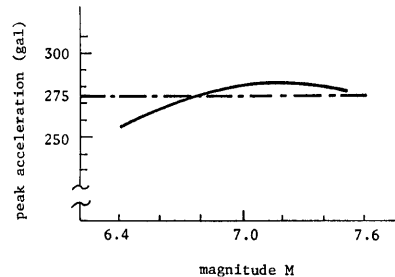


Fig. 13. Peak Acceleration of Epicentral Distance $d=d_0$ (km).

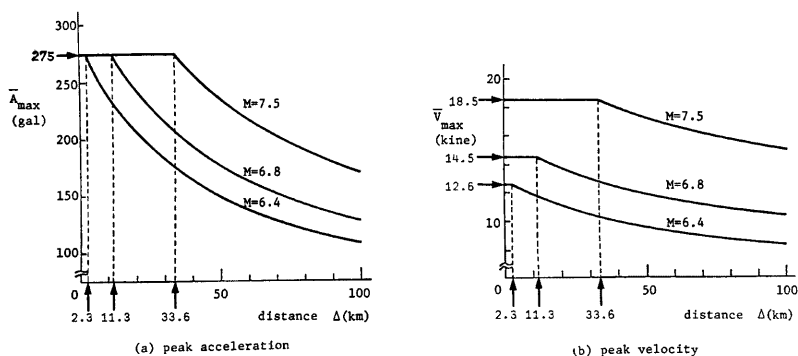


Fig. 14. Attenuation Equation of Peak Acceleration and Velocity with Consideration of Epicentral Area.

Fig. 14 に、想定地震に対する最大加速度・最大速度のアテニュエーション特性を示した。ただし、図中の値は地盤条件を考慮しない場合のものであり、各地点の地盤条件によりこれらの地震動強度が増減することは言うまでもない。

さて、Fig. 15(a)～(c)、Fig. 16 (a)～(c) に想定地震に対する京都市各地点での最大加速度・最大速度の期待値を示した。各図の地盤メッシュは500m×500mであり、各メッシュ内で得られているボーリング資料のうち最も深い所までデータのあるものをそのメッシュの代表値として選んだ。ここで対象とした想定地震に対して、各地点での地震動強度は震央位置よりも地盤条件に大きく影響を受けることを示している。すなわち、どの地震に対しても市南部の軟弱な地盤で地震動強度が相対的に卓越している。また、最大速度は Fig. 14 のアテニュエーション特性を反映してマグニチュードの大きい地震 (C) の場合が各地点で最も大きくなることを示している。

4.3 地盤ひずみ推定のためのマイクロゾーニング

本節では3.2で示した手法により京都市地盤の地盤ひずみに関するマイクロゾーニングの結果を示す。

はじめに、4.1で示した京都市地盤の概要をもとに、京都市地盤の山地部、平野部より98地点を選び、3.1で用いた手法により想定地震 (B) によるこれらの地点での最大速度、地盤ひずみを算出した。ただし、表層のS波速度は「水道施設耐震工法指針・解説¹⁶⁾」に示されている推定式 (Table 6) を用いてN値より推定し、地盤深部のS波速度は Table 7¹⁷⁾ の値を用いた。また、表面波の分散曲線を算出するのに必要なP波速度は Table 8 の式により求め、各地質の単位体積重量は Table 9 の値を用いた。

Table 6. Estimation of S-wave Velocity.¹⁶⁾

geomaterial		V_s (m/sec)
diluvial	clay	$129N^{0.183}$
	sand	$123N^{0.125}$
alluvial	clay	$122N^{0.0777}$
	sand	$61.8N^{0.211}$

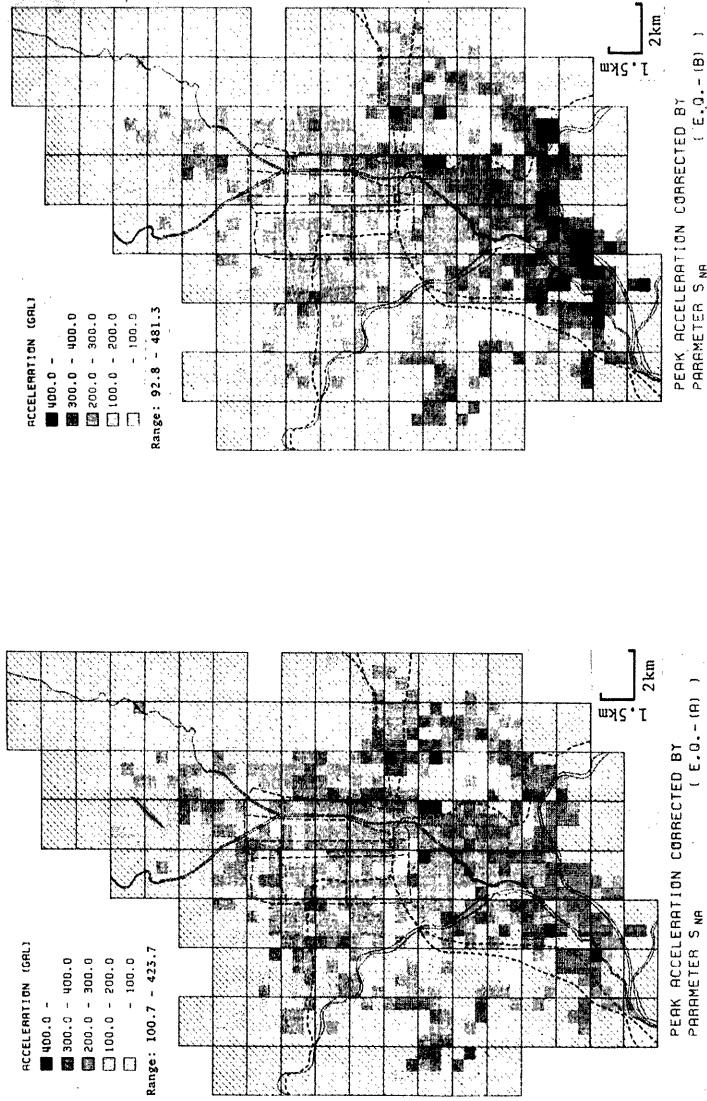


Fig. 15(b). Microzonation of Peak Acceleration in Kyoto (Earthquake (B)).

Fig. 15(a). Microzonation of Peak Acceleration in Kyoto (Earthquake (A)).

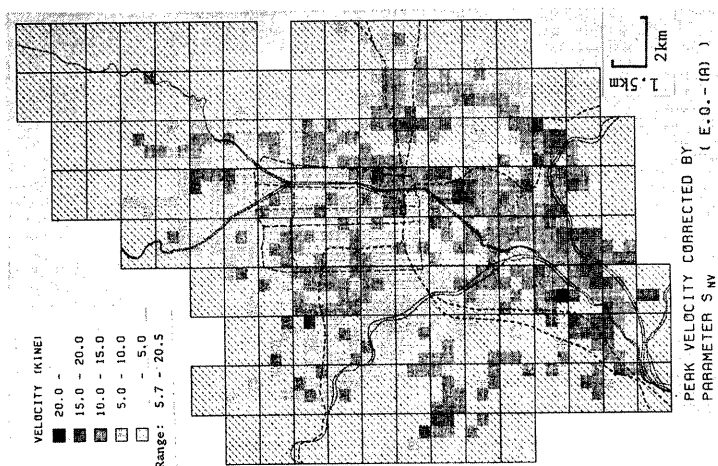


Fig. 16(a). Microzonation of Peak Velocity in Kyoto (Earthquake (A)).

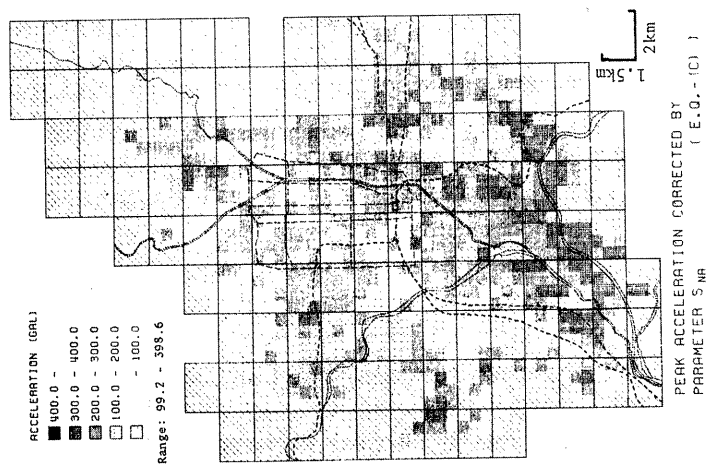


Fig. 15(c). Microzonation of Peak Acceleration in Kyoto (Earthquake (C)).

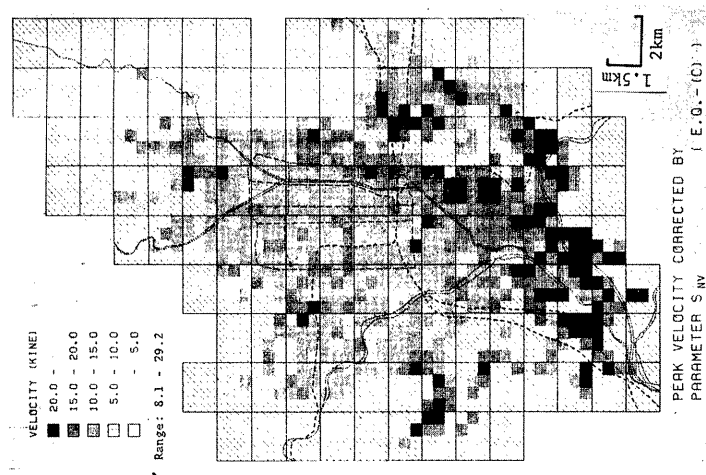


Fig. 16(c). Microzonation of Peak Velocity in Kyoto (Earthquake (C)).

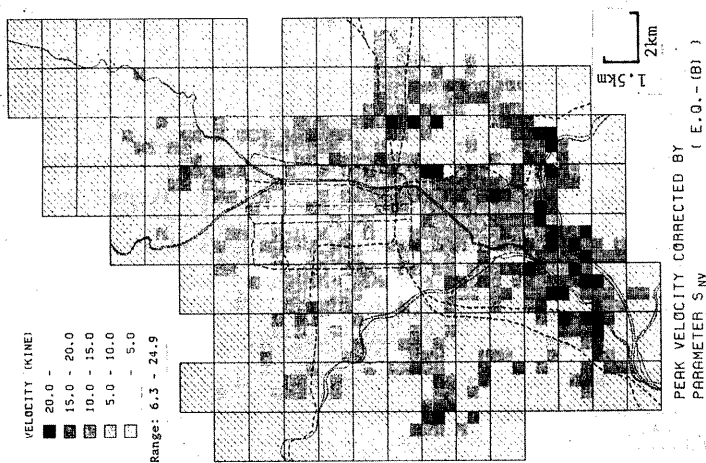


Fig. 16(b). Microzonation of Peak Velocity in Kyoto (Earthquake (B)).

Table 7. Physical Constants Used for Computations.¹⁷⁾

	thickness (m)	V_p (m/sec)	V_s (m/sec)	weight per unit volume (gr/cm ³)
Upper Diluvium	—	250	830	1.9
Osaka Layer	200	600	2000	1.7
Tertiary	—	2700	4850	2.0

Table 8. Estimation of P-wave Velocity.

geomaterial	Poisson's ratio ν	P-wave velocity
sand	0.45	$V_p = 3.32V_s$
clay	0.46	$V_p = 3.67V_s$

Table 9. Estimation Values of Weight per Unit Volume.

geomaterial	weigh per unit volume (gr/cm ³)
clay	1.5
silt	1.4
sand	1.8
gravel	1.9

Fig. 17(a), (b) に平野部および山地部での相関距離 $D=5\text{m}$, 100m での最大平均ひずみと最大速度との関係を示した。図中の実線は最小自乗法により得た平均的なみかけの伝播速度である。 $D=5\text{m}$ の場合ごく表層付近の地盤条件の影響を強く受けその結果直線まわりでのばらつきは大きい。また、 $D=100\text{m}$ の場合は平野部、山地部とも $c \sim V_{max}$ 間の相関が比較的強い。また、 $D=5\text{m}$ の山地部での図で、表層厚 d_f (m) が 20m 程度以上の地点とそれ以下の地点で異なる傾向を示している。表層厚が 20m 程度以上の地点ではみかけの伝播速度は平野部の値で近似でき、 20m 程度以下の地点では $c=20\text{m/sec}$ と大きな値となる (図中の破線)。したがって、局部ひずみを対象とする場合は、平野部と山地部というように単純に分けるのではなく、平野部と山地部のうち表層厚 d_f (m) が 20m 程度以上の地域、およびそれ以外の山地部とに分けた方が適当であろう。以下に京都市域地盤のみかけの伝播速度の概略値を示し、これを用いて想定地震に対する地盤ひずみを推定する。

1) $D=5\text{m}$ の場合 (局部ひずみを対象とする場合)

- (a) 平野部と表層厚 d_f が 20m 程度以上の山地部 …… $c=210\text{m/sec}$
 - (b) 山地部 (表層厚 d_f が 20m 程度以下) …… $c=720\text{m/sec}$
- みかけの伝播速度の代表値 …… $c_m=210\text{m/sec}$

2) $D=100\text{m}$ の場合 (比較的離れた異地点間の相対変位を対象とする場合)

- (a) 平野部 …… $c=1,030\text{m/sec}$
 - (b) 山地部 …… $c=1,690\text{m/sec}$
- みかけの伝播速度の代表値 …… $c_m=1,030\text{m/sec}$

京都市地盤の全地点が上記のどちらの地盤に相当するかを調べ、それぞれの地点の最大速度の補正係数 C_s を用いて地盤ひずみ推定のための地盤パラメータ I_s を地域全体で求めることができる。ここに、式(8)における C_s は、 $D=5\text{m}$ の場合1.0 (平野部および表層厚 20m 程度以上の山地部) および3.43 (表層厚 20m 程度以下の山地部)、 $D=100\text{m}$ の場合1.0 (平野部) および1.64 (山地部) となる。

Fig. 18～Fig. 20 に想定地震による最大地盤ひずみの期待値を示した。これらの図より、地盤ひずみは前出の最大加速度・最大速度と同様地盤条件の影響を強く受け、市南部で大きな値となっている。また最大速

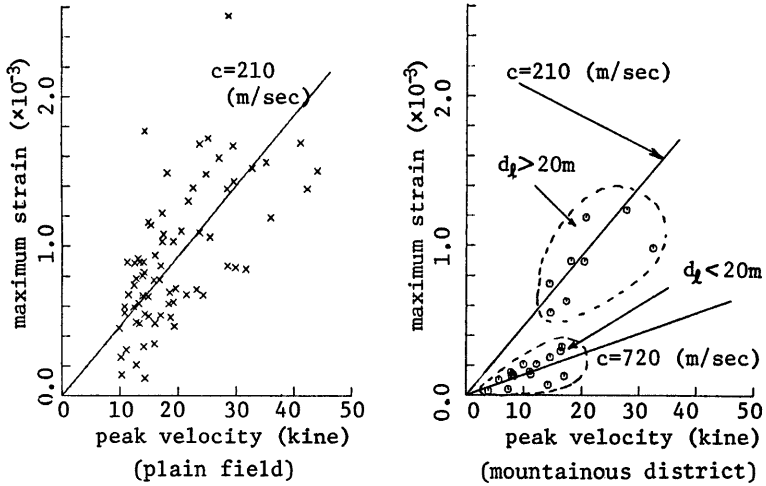


Fig. 17(a). Relation between Maximum Strain, Peak Velocity, and Apparent Propagation Velocity (Separation Distance $D=5\text{m}$).

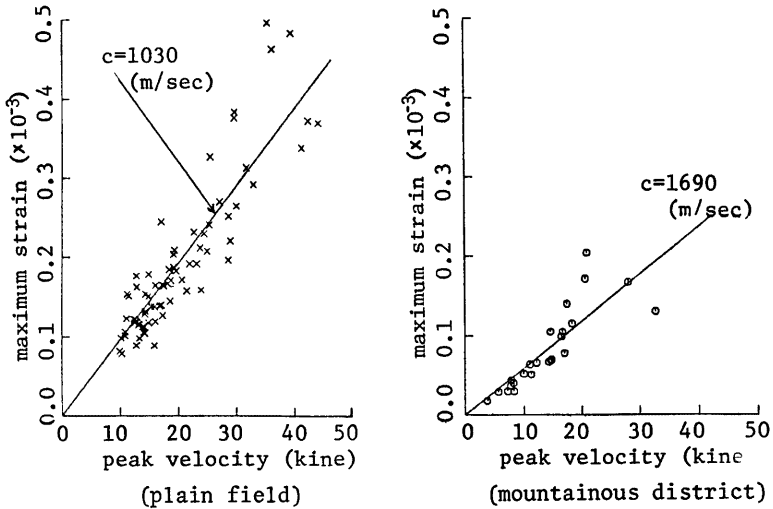


Fig. 17(b). Relation between Maximum Strain, Peak Velocity, and Apparent Propagation Velocity (Separation Distance $D=100\text{m}$).

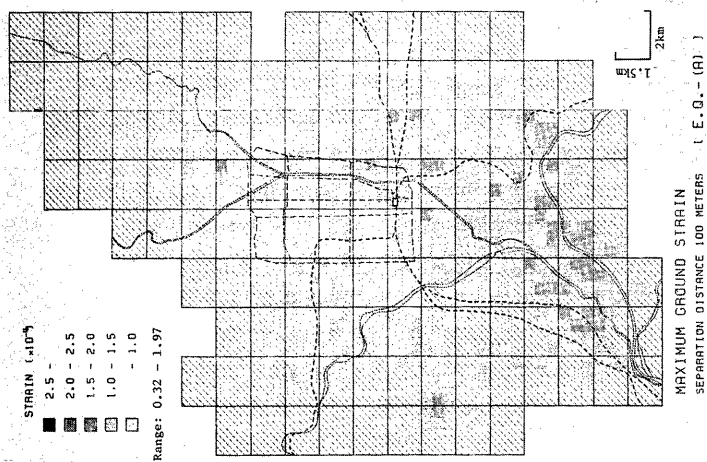


Fig. 18(b). Microzonation of Maximum strain in Kyoto (Separation Distance $D=100\text{m}$, Earthquake (A)).

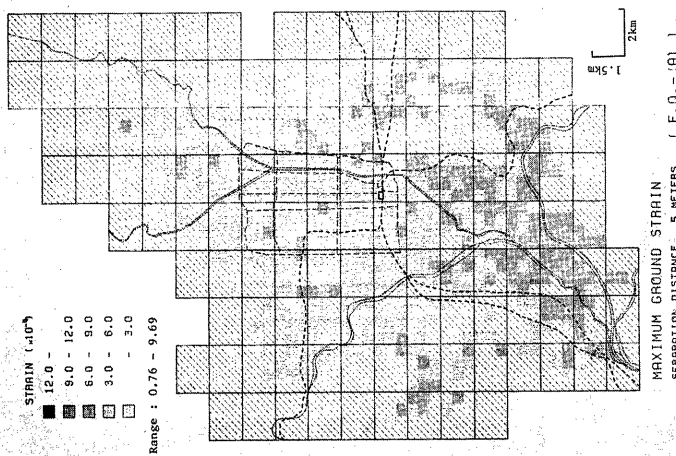


Fig. 18(a). Microzonation of Maximum Strain in Kyoto (Separation Distance $D=5\text{m}$, Earthquake (A)).

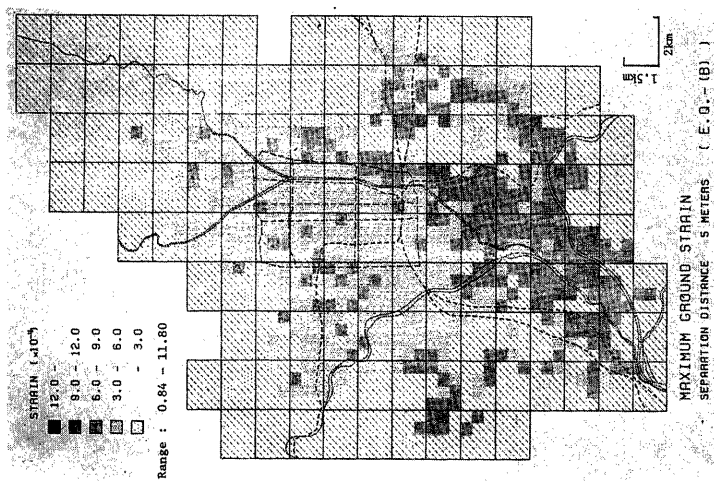


Fig. 19(a). Microzonation of Maximum Strain in Kyoto (Separation Distance $D=5$ m, Earthquake (B)).

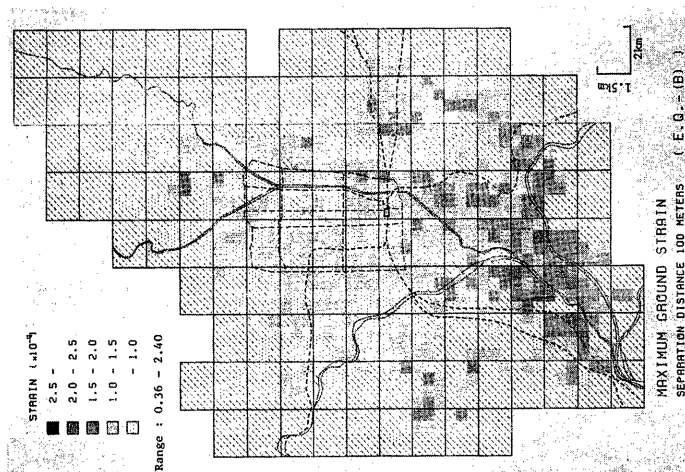


Fig. 19(b). Microzonation of Maximum Strain in Kyoto (Separation Distance $D=100$ m, Earthquake (B)).

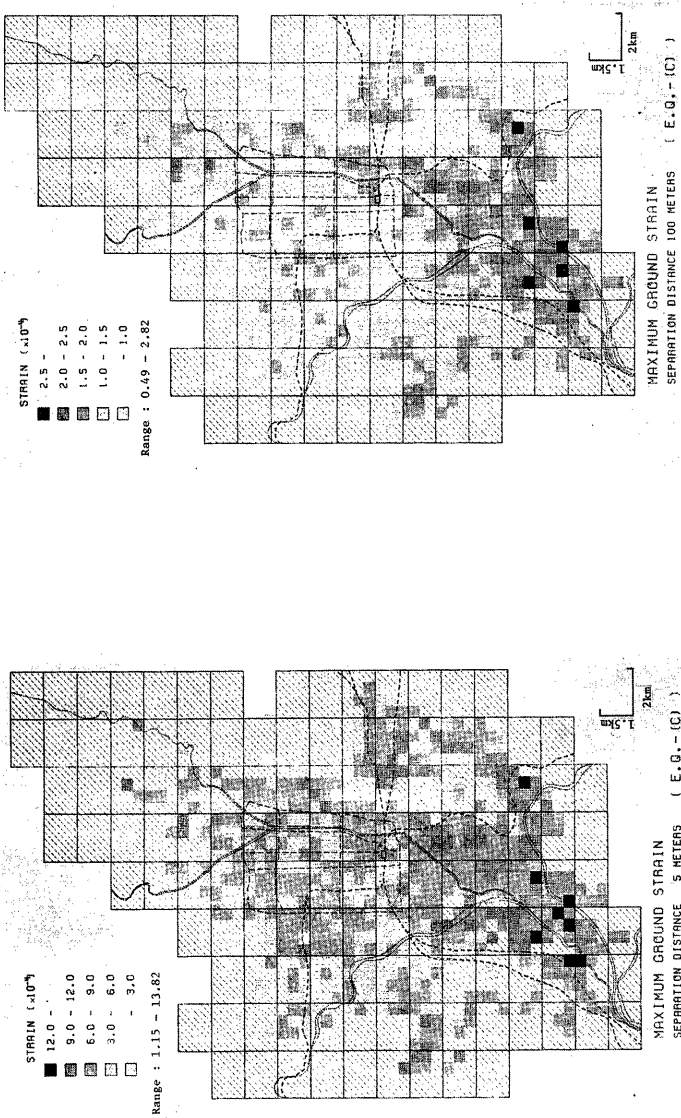


Fig. 20(b). Microzonation of Maximum Strain in Kyoto (Separation Distance $D=100\text{m}$, Earthquake (C)).

Fig. 20(a). Microzonation of Maximum Strain in Kyoto (Separation Distance $D=5\text{m}$, Earthquake (C)).

度の場合と同様地震規模の大きな地震 (C) の場合が各地で最も大きな値を示していることがわかる。相関距離 $D=5\text{m}$ の平均ひずみはどの想定地震に対しても 10^{-3} を超える地盤が現れ、地震 (C) の場合では北部においてもそのような地盤がある。また $D=100\text{m}$ の場合では最大地盤ひずみは $1\sim 3\times 10^{-4}$ 程度である。

さて、ここでは各想定地震に対して地盤ひずみの簡易推定法により地盤ひずみの期待値の分布図を作成し、京都市域地盤の評価を行った。地盤条件を考慮してはいるが地震動強度の不確定性は大きく、ここで得られた各地点の地盤ひずみの絶対値は大きなばらつきをもつものである。ただし、前にも述べたように同一地震による各地点での地震動は強い相関をもつと考えられるので、Fig. 18~20 の結果は各地点の地盤ひずみの相対的な違いを定量的に表わしているものと考えられる。

5. 結 論

本研究では、埋設管の震害予測を行ううえで重要な地盤のマイクロゾーニングの手法を確立することを目指して、地盤条件の連続量による評価法を提案し京都市地盤を例として地震動最大加速度・最大速度および表面波伝播に伴い生じる地盤ひずみに関するマイクロゾーニングを行った。以下に得られた結果を要約する。

- (1) 最大地動予測における N 値を用いた地盤条件の評価法を提案し、最大加速度・最大速度推定における連続量による地盤パラメータを定義した。
- (2) 既に提案した表面波伝播に伴う地盤ひずみの推定法⁴⁾を用いて各地盤条件と地盤ひずみとの関係を検討するとともに、地盤ひずみ推定のための地盤パラメータを定義し、ある地域での地盤ひずみの分布を簡易的に推定する手法を提案した。
- (3) 京都市地盤を例にとり、想定した3つの地震に対する最大加速度・最大速度および地盤ひずみの分布図を作成した。

なお、本研究では主として表面波伝播による地盤ひずみを対象にマイクロゾーニングを行う手法を提案した。一方、埋設管の震害例には地盤の液化化や永久変形によるものも多い。液化化に関しては岩崎・龍岡¹⁸⁾による簡易推定法が提案されており、このような他の外力条件に関するパラメータをも組み入れてマイクロゾーニングを行うことが重要である。

本研究で用いた地盤資料の整理に際しては、当研究室の学生諸君に多大の御協力を頂いた。また、本研究の一部は文部省科学研究費補助金の援助を受けた。記して深謝の意を表する次第である。なお、本研究の数値計算は京都大学大型計算機センターのM-200システムによるものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Toki, K. and Sato, T., "Estimation of Damage of Water Distribution Systems by Earthquakes", Recent Advances in Life-line Earthquake Engineering in Japan, ASME, 1980, pp. 89-96.
- 2) Shinozuka, M., Takada, S., and Ishikawa, H., "Some Aspects of Seismic Risk Analysis of Underground Lifeline Systems", Technical Report No. NSF-PFR-78-15049-CU-1, Columbia University, August 1978.
- 3) Kameda, H., Sugito, M., and Asamura, T., "Simulated Earthquake Motions Scaled for Magnitude, Distance and Local Soil Conditions," Proc. 7WCEE, Vol. 2, 1980, pp. 295-302.
- 4) 後藤尚男・亀田弘行・高田至郎・杉戸真太：埋設管の震害予測のための地震動の推定法について，京都大学防災研究所年報，第23号B-2，昭. 55. 4, pp. 13-27.
- 5) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太：地震動予測における N 値を用いた地盤条件の評価法について，第17回自然災害科学総合シンポジウム講演集，昭. 55. 10, pp. 605-6 8.
- 6) 阪口 理： N 値利用上の問題点，土と基礎，第196号，1974，pp. 83-89.
- 7) 後藤尚男・亀田弘行・杉戸真太・今西直人：デジタルフィルターによる SMAC-B2 加速度計記録の補正について，土木学会論文報告集，第277号，昭. 53. 9, pp. 57-70.

- 8) 亀田弘行・中村重久：地震活動度，地震動および津波，土木学会関西支部講習会テキスト，都市の耐震防災抜萃，昭. 55. 7, pp. 16-30.
- 9) 亀田弘行・杉戸真太・石川 裕：地震動のアテニュエーション特性とマイクロゾーニングに関する23の問題，第36回土木学会年次学術講演会講演概要集，第I部，昭. 56. 10（登載予定）.
- 10) 小堀鐸二：京都市の地盤について（地盤図とその考察），京都市防災会議，昭. 53. 6.
- 11) 京都市総務局：京都市ボーリング資料図，昭. 54.
- 12) 石田志郎：主要都市及びその周辺部の地盤特性と基礎工法，その1，西日本編，報文4，近畿地区京都（基礎工 Vol. 4, No. 12, pp. 95-103），昭. 51.
- 13) 小沢泉夫：京都市に被害をもたらす地震の想定について，京都市防災会議，昭. 53. 6.
- 14) 小泉敏一・望月敏男・宮野道雄：1978年伊豆大島近海地震における墓石調査による震度についての検討，土木学会第35回年次学術講演会概要集，第I部，pp. 368-369.
- 15) 村松郁栄：震度分布と地震のマグニチュードとの関係，岐阜大学教育学部研究報告—自然科学—，第4巻第3号，昭. 44. pp. 168-176.
- 16) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，昭. 54, pp. 9-11.
- 17) 大阪市防災会議地震専門部会（吉川宗治・岩崎好規）：大阪地盤の地震時特性，昭. 47. 11, p. 6.
- 18) 岩崎敏男・龍岡文夫・常田賢一・安田 進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，昭. 53. 11, pp. 641-648.