

(40) 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

京大工学部 正 後藤尚男・〇杉戸真太・亀田弘行 京大大学院 学 磯田厚志

1. まえがき

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は、Toki and Sato¹⁾、Shinozuka, Takada and Ishikawa²⁾ ほかがある。これらの研究では表層地盤のS波速度や液状化危険度に着目して地盤条件を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をもつ地盤は多様に変化している場合が多く、表層の地盤条件は連続量により表現することが望ましいと考えられる。本報告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挙げ、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。

2. 地盤条件による地震時地盤ひずみの特性

先の研究²⁾では、非定常地震動の予測モデル⁴⁾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⁵⁾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方法を提案した。ここでは、種々の地盤モデルを設定して、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し、次節で扱う地盤ひずみの簡易推定法を検討するうえでの資料とする。

一般に、わが国の都市の存在する平野部の表層地盤では、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、図-1に示す15の地盤モデルを設定し以下に示す検討を行った。

地盤 G-11~G-15: ごく表層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

図-1の15地盤に対し、想定地震 ($M=6.8$, 震央距離 $\Delta=15$ km) による表面波伝播に伴う地盤ひずみ等を算出した。ここで対象とした表面波は縦波(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。表-1に、各地盤での最大平均ひずみ $\bar{\epsilon}_{max}$ 、地震波のみかけの伝播速度 $c(=V_{max}/\bar{\epsilon}_{max})$ 、最大加速度 A_{max} 、および最大速度 V_{max} を示した。ただし、 $\bar{\epsilon}_{max}$ 、 c は地盤の相対運動算定における相間距離 D を 5 m および 100 m としたときの値である。 $D=5$ 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、 $D=100$ m での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。これらの結果より以下のことが言えよう。

- 1) 地動最大加速度、速度、および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、表層部が軟弱なほどひずみは大きい。
- 2) 表層の軟弱層厚はみかけの伝播速度 c に比較的大きく影響する(G-21~25)。

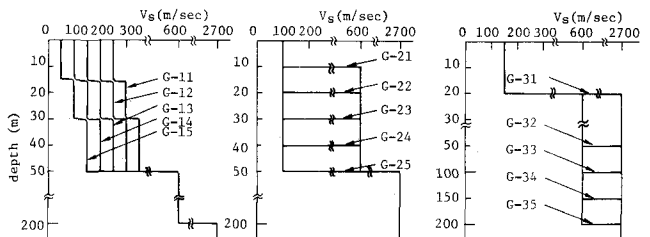


図-1 解析に用いた地盤構成モデル

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はあまり影響せず、むしろ岩盤($V_s = 2700 \text{ m/sec}$ 程度)が地表面下数10m程度以下になると相間距離 $D=100\text{m}$ でのみかけの伝播速度が急激に大きくなる傾向にある(7-31~35)。

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、相間距離 $D=5\text{m}$ ではおおむね表層のS波速度に近く $c=100\sim 200 \text{ m/sec}$ 程度、 $D=100\text{m}$ では $c=600\sim 1400 \text{ m/sec}$ 程度である。

図2に、地震動波形とひずみ波形の一例を地盤G-11, 15について示した。ひずみ波形と比較すると、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、堅い地盤のG-11では $D=5\text{m}$ でとくに高振動数成分が卓越しひずみレベルが小さい。

ここで得られた結果より、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の伝播速度 $c(=V_{\text{max}}/E_{\text{max}})$ に大きく影響することが明らかになった。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手法を示す。

3. 地盤ひずみの簡易推定法とマイクロゾーニングへの応用

上記の数値計算で用いた地盤ひずみ推定の手法は、想定された M, Δ 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間距離 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の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多大な計算時間を必要とし、また地域全体にわたって深い地盤資料を得ることも現実的には困難である。そこで、上記の手法を部分的に利用し、一般には地盤の最大速度を震害記録の統計解析より得られるアテニエーション式により推定してそれに対し地盤の N 値分布等により連続量で表わされる地盤パラメータを乗ずることにより地盤ひずみを簡易的に推定する手法を示す。

地盤ひずみと速度振幅 V との関係を近似的に表す式 $\varepsilon = V/c$ 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、他の地点については地質図等を用いて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。このようにして地域全体の c を概略的に知ることができ、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_a を定義することができる。

$$\bar{\varepsilon}_{\text{max}} = \frac{C_v \cdot V(M, \Delta)}{100 \times c_i} = \frac{C_v}{C_p} \frac{\bar{V}(M, \Delta)}{100 \times c_m} = I_a \frac{\bar{V}(M, \Delta)}{100 \times c_m} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、 $\bar{V}(M, \Delta) = M, \Delta$ よりアテニエーション式により得られる最大速度の期待値(cm/sec)、 C_v = 表層の地盤

表-1 各地盤モデルにおける最大平均ひずみ、みかけの伝播速度、および最大地震動

	$\varepsilon_{\text{max}} \times 10^{-4}$ ($D=5\text{m}$)	$\varepsilon_{\text{max}} \times 10^{-4}$ ($D=100\text{m}$)	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	299.7
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	2.5	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

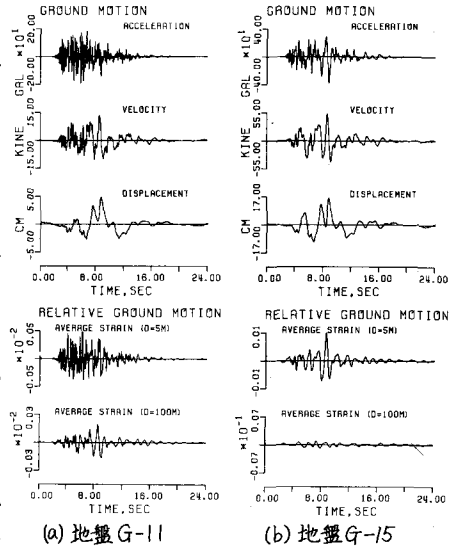


図-2 非定常地震動と地盤ひずみ ($M=6.8, \Delta=15\text{km}$)

条件による最大速度の補正係数⁷⁾, C_i = 着目地点で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と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, $I_a = C_i / C_p$ となる。表層の地盤条件による最大速度の補正係数 C_v は, 地盤の N 値分布より連続量として表わされる地盤パラメータ S_{Nv} により以下のように得られる。

$$C_v = C_m^{S_{Nv}} \text{-----}(2), S_{Nv} = (S_L - \beta) / (V_2 - \beta) \text{-----}(3), S_L = \int_0^{d_a} \exp\{-\gamma_1 N(x)\} \exp\{-\gamma_2 x\} dx \text{-----}(4)$$

ここに, $N(x) = N$ 値, d_a = ボーリング資料が得られている深さ(m), γ_1, γ_2 = 定数, $\beta = C_v$ を 1 とする S_L の値であり, 各係数の値はわが国における強震記録とそれらの得られた地盤条件より決めたものである(表-2)。

さて, 式(1)で定義される地盤パラメータ I_a 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パラメータであり, M, Δ より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の程度増減するかを表す量である。以下に, パラメータ I_a 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_v 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に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。さらにその中より代表値 C_m を決定する。
- 3) ボーリング資料, 地質図等により各地点が2)で対象とした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_a 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 $V(M, \Delta)$ を $100 \times C_m$ で除した値に対して, 3)で得られたパラメータ I_a を乗することにより地域全体の地盤ひずみの期待値を得る。

4. 京都市地盤のマイクロゾーニング

京都市地盤を例にとり, 前節で示した地盤パラメータを用いて想定地震に対する各地点での地盤ひずみを推定する。想定地震は文献8)に示される3つの地震でありその規模および震央位置を図-3に示した。以下前節に示した手順に従って結果の概略を述べる。

1) 京都市域を $500m \times 500m$ のメッシュに分割し, 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部まで得られているものをメッシュの代表値として地動最大速度の補正係数 C_v の分布図を作成した。

2) 京都市地盤の地質学的な特徴を参考にして平野部および山地部に大きく分けることができるとし, それぞれの地域より98地点を選んで2.で示した方法により地盤ひずみ等を算出した。その結果, 図-4, 5に示されるようにみかけの伝播速度に関して以下のような特徴があることが判った。

- a) $D=5m$ の場合(局部ひずみを対象とする場合)
 - i) 平野部と表層厚 d_0 が $20m$ 以上の山地部 --- $C = 210$ m/sec
 - ii) 山地部(表層厚 d_0 が $20m$ 以下) --- $C = 720$ m/sec
 みかけの伝播速度の代表値 --- $C_m = 210$ m/sec
- b) $D=100m$ 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)
 - i) 平野部 --- $C = 1,030$ m/sec
 - ii) 山地部 --- $C = 1,690$ m/sec
 みかけの伝播速度の代表値 --- $C_m = 1,030$ m/sec

3) 京都市地盤の各地点が(i), (ii)のどちらに属するかを判断し, 1)で得られた

表-2 地盤条件を考慮した地震動推定のためのパラメータ

	γ_1	γ_2	β	C_m
最大加速度	0.015	0.194	3.761	2.238
最大速度	0.044	0.134	3.580	2.878

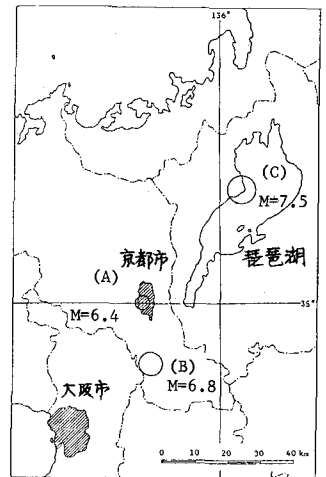


図-3 想定地震の規模と震央位置

C_0 および2)で得られる C_p とから各地点での各相間距離に対する地盤パラメータ I_a の分布図を作成する。
 4)想定地震に対する各地点での地盤条件を考慮しない場合の最大速度の期待値 $V(M, \Delta)$ に対し、3)で得られたパラメータ I_a を乗ずることにより最大ひずみの期待値を得る。ただし、地震A, Bのような直下型地震に対しては震央域を考慮したアテニュエーション式⁷⁾を用いた。詳細は文献9)によらるたい。

図-6~9に、想定地震B, Cによる相間距離 $D=5m, 100m$ についての地盤ひずみの期待値を示した。

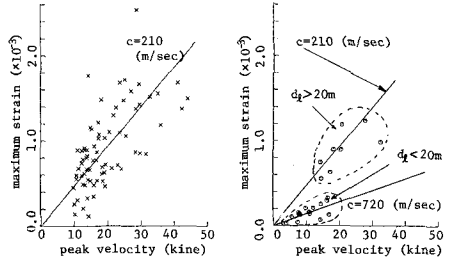


図-4 地盤最大速度と最大ひずみの関係($D=5m$)

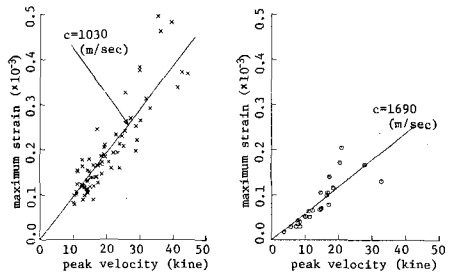


図-5 地盤最大速度と最大ひずみの関係($D=100m$)

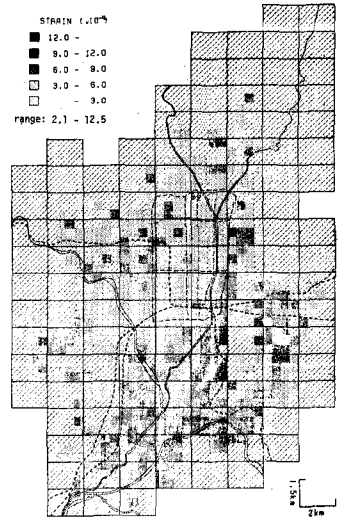


図-6 地盤ひずみの期待値(地震B, $D=5m$)

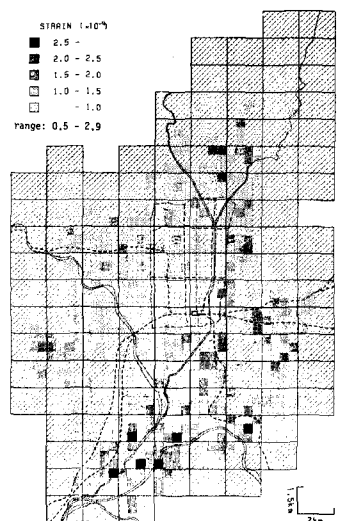
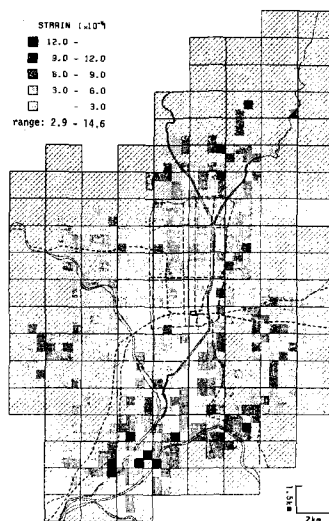
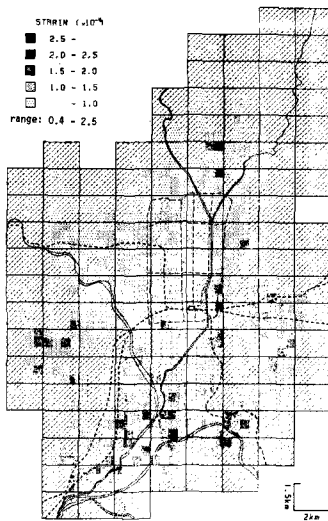


図-7 地盤ひずみの期待値(地震B, $D=100m$) 図-8 地盤ひずみの期待値(地震C, $D=5m$) 図-9 地盤ひずみの期待値(地震C, $D=100m$)

1) Toki and Sato; Recent Advances in Life-line Earth. Engrg. in Japan, ASCE, No.2) Shinozuka, Takada and Ishikawa; Technical Report No. NSF-PFR 78-15047-CU-1, 1978
 3) 後藤・亀田・高田・杉戸; 京都大学防災研究所年報, 23号B2, 1980. 4) Kaneda, Sugito, Asamura; TWCEE, Vol.2, 1980, pp.295-302.
 5) Takada and Wright; TWCEE, Vol.1, 1980, pp.1-6. 6) 後藤・杉戸・亀田・藤田; 京都大学防災研究所年報, 24号B, 1981.
 7) 後藤・亀田・杉戸; 第17回自然災害科学総合シンポジウム, 1980. 8) 小沢; 京都市防災会議, 昭53.6.
 9) 亀田・杉戸・石川; 土木学会第36回年次学術講演会, 第I部, 昭54.10. (発表予定)