

(27) 積分方程式による不整形地盤の震動解析

京都大学防災研究所 正員 土岐憲三  
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信  
 本州四国連絡橋公団 正員 ○藤田和朗

1. まえがき

地形あるいは地盤構成が変化しやすい、いわゆる不整形地盤において地盤震害を生じやすいことが、過去の多くの震害調査において指摘されている。特に、埋没谷地形では、軟弱な表層が厚く堆積し、また地盤構成が急激に変化することが多い。したがって、埋没谷地形上に形成された都市の防災対策を樹立するためには、不整形地盤の地震時挙動を把握しておかねばならない。本研究では、埋没谷地形を対象として、積分方程式を用いた震動解析を行った。単純なモデル(2種類)および大阪平野と北神戸の一地域の地盤をモデル化したものに対し解析を行い、考察を加えた。なお、波動はSH波に限定した。

2. 積分方程式による解析法

Somigliana による積分方程式は、観測点 $z_0$ が境界面 $S$ 上になければ、次式で与えられる。

$$\int_S \{P_{hi}(z, z_0) t_i(z) - G_{hi}(z, z_0) u_i(z)\} ds = u_h(z) \quad (1)$$

ここに、 $u_i, t_i$  は各々点 $z$ における変位、表面カベクトルであり、 $P_{hi}$ と $G_{hi}$  は2次元弾性体中の基本特異解である。図-1に示すような埋没谷地形下は、領域I, IIに対し積分方程式を立て、境界面 $S$ 上下の $z$ の並びに変位の連続条件から両領域の積分方程式を連結する。連続条件は次式によって与えられる。

$$\left. \begin{aligned} u_I + u_{II} + u_0 &= 0 \\ u_I + u_{II} &= u_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 $u_0, u_0$  は一様半無限地盤の解であり、 $z$ の並びに $z_0$ の添字I, IIは領域I, IIから見た境界面 $S$ 上の値を示すために用いている。

式(1)を式(2)の条件下で一般的に解くことは困難なので、これを離散化して解析を行う。これには、積分方程式を直接離散化する方法<sup>1)</sup>と、境界面上の離散剛性マトリックスを導き、積分方程式系を、境界面上の節点変位に関する連立方程式に置換する方法<sup>2)</sup>とがある。後者の方法によれば、一般的に次式をうる。

$$[K_I + K_{II}] \{u_s\} = -\{f_0\} + [K_I] u_0 \quad (3)$$

ここに、 $K_I$ と $K_{II}$  はIとIIの領域における積分方程式を離散化することによって求められる離散剛性マトリックスである。なお、領域I, IIが多層構造の場合も式(3)と同様方程式系が求められる。

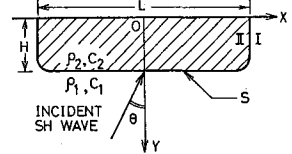


図-1 地盤モデル

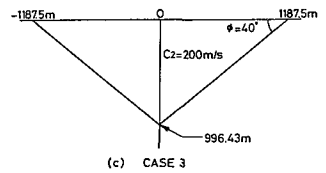
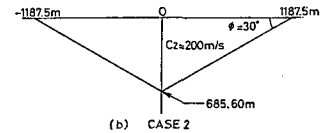
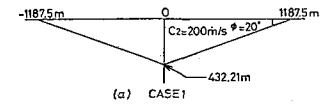


図-2 二層地盤モデル

表-1 1次共振状態

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
振動数(Hz)	0.148	0.105	0.085
応答倍率	4.9	5.5	6.0

表-2 重複反射理論による解

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
振動数(Hz)	0.116	0.073	0.050
応答倍率	4.0	4.0	4.0

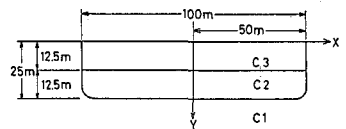


図-3 三層地盤モデル

より上部と下部に分け図-6 のようにモデル化したものである。地盤定数は、単位体積重量が  $1.8 \text{ t/m}^3$ 、せん断波速度が表層  $300 \text{ m/sec}$ 、半無限領域  $600 \text{ m/sec}$  とした。図-7, 8 は  $X = -3 \text{ km}$ ,  $+3 \text{ km}$  における地表面の周波数応答倍率である。図中の実線は重複反射理論 (M.R.T.) により求めたものであり、地盤構造は当該地点直下の構造が水平方向に一樣に拡がっていると仮定した。地震波が鉛直下方から入射する場合には、重複反射理論により、地盤の増幅度を推定できることが判明する。また、水平に近い角度で入射する場合には、低振動数領域で入射側よりもその反対側の地点の応答倍率が大きくなる。これは、反対側境界で反射した波が、入射側の地表面に到達するまでに数回の反射・屈折をすることにより、基礎層へ波動のエネルギーが遠散してしまうためと考えることができる。図-9, 10 は  $0.24 \text{ Hz}$  における地表面に沿った応答倍率分布とせん断ひずみの分布図である。図-9 から、鉛直下方から地震波が入射する場合には、重複反射理論による近似度の高いことがわかる。入射角によって最大応答を示す位置も変化する。例えば、谷中央付近では、入射角  $0^\circ$  と  $60^\circ$  の場合に応答値が減少しているが、入射角  $30^\circ$  ではピーク値が発生している。このことは、入射角の変化に対し、境界での屈折・反射の状態がかなり大きく変化することを示しており、不整形地盤の震動解析では、地震動の入射角に対して十分な検討を加えておく必要があることを示唆している。図-10 から明らかのように、ひずみは、地層境界でギャップを生じており、谷中央付近で非常に大きくなっていることがわかる。また、この振動数では、応答倍率の分布形とひずみのそれは良く似た傾向を持っていることがわかる。図-11 は、El Centro (1940) の NS 成分の記録 20 秒間を用い、 $0.5 \text{ Hz}$  以上の振動数成分を除いて応答解析を行った結果から求まる、地表面の最大応答加速度を示したものである。

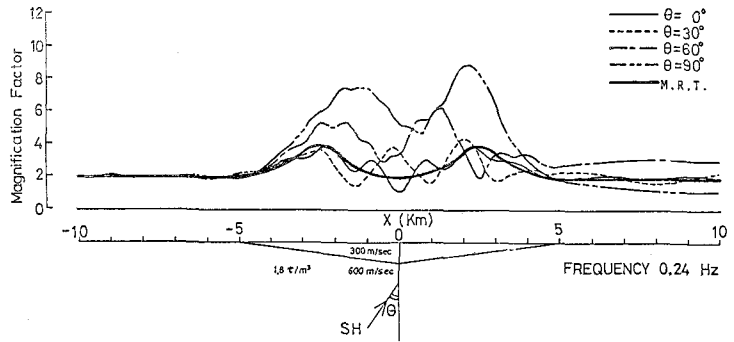


図-9 地表面応答倍率分布図 (0.24 Hz)

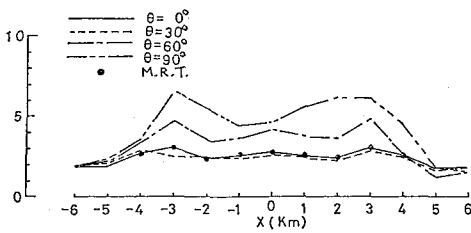


図-11 地震応答解析・最大加速度応答倍率

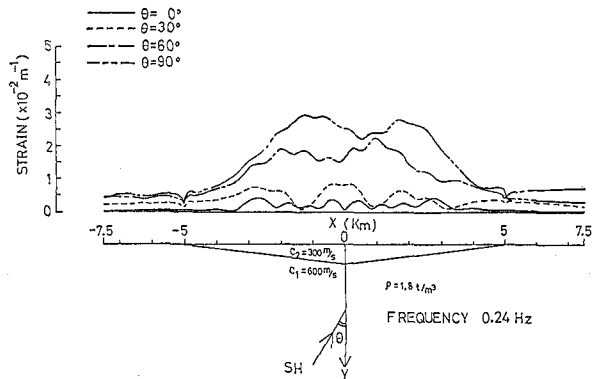


図-10 地表面ひずみ分布図 (0.24 Hz)

表-5 地盤の定数

地層	CASE 1		CASE 2	
	C (m/sec)	比体積	C (m/sec)	比体積
表層	110	2.182	190	1.263
下層	240	1.750	240	1.750
半無限領域	420		420	

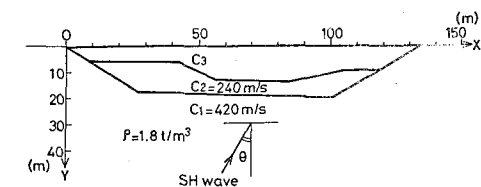


図-12 地盤モデル

### 3. 解析結果

数値解析は4種類の地盤モデルに対して行った。1番目のモデルは、図-2に示したくさび形地盤である。地盤の定数は、単位体積重量  $1.8 \text{ t/m}^3$ 、せん断波速度が半無限領域で  $400 \text{ m/sec}$ 、谷内部で  $200 \text{ m/sec}$  である。SH波の入射角が  $0^\circ$  の場合の谷中央表面での1次共振振動数と応答倍率を表-1に、谷中央での地層構成が水平方向に一樣に拡がっていると仮定し、重複反射理論により求めた結果が表-2に示されている。両者を比較することにより、表層底面の傾斜角が小さくなるにつれて、重複反射理論による近似度が高くなる事がわかる。

2番目のモデルは、図-3に示した三層地盤モデルである。地盤定数を表-3に示した。Cはせん断波速度 ( $\text{m/sec}$ ) を表わしており、単位体積重量は  $1.8 \text{ t/m}^3$  とした。表-3に示した4つのケースについて、谷中央表面における1次共振振動数  $f_1$  と応答倍率  $m_1$  が表-4に示されている。各層間のインピーダンス比と表-4の値を比較することにより、1次共振振動数は表層と中間層とのインピーダンス比に依存し、中間層は応答倍率に大きな影響を及ぼさないことなどが判明する。図-4は、左側から水平にSH波が入射した場合の、地盤内応答倍率の鉛直分布を示したものである。この図から、谷内部に入射した波が表面波を生成していることが読み取れる。この波の位相速度が  $276 \text{ m/sec}$  であり、水平方向に一樣に拡がると仮定した地盤のLove波の位相速度が  $277 \text{ m/sec}$  であるから、この表面波はLove波に対応するものであると推測される。

3番目のモデルは、図-5に示した大阪平野の洪積層を対象としたもので、図中のA-B線

表-3 モデルの定数

CASE	1	2	3	4
C1	450	600	600	800
C2	300	300	400	300
C3	200	200	200	200
C2/C1	0.667	0.500	0.677	0.375
C3/C1	0.444	0.333	0.333	0.250
C3/C2	0.667	0.667	0.500	0.667

表-4 1次共振状態(入射角  $0^\circ$ )

CASE	1	2	3	4
$f_1$	2.50	2.60	3.05	2.65
$m_1$	3.80	5.75	5.10	9.75

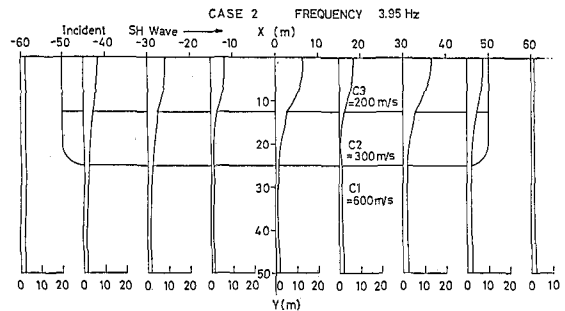


図-4 表面波の発生

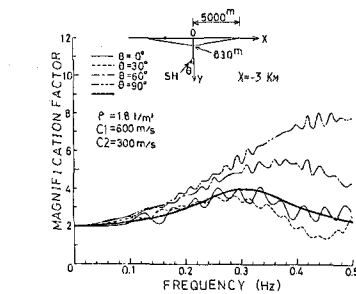


図-7 周波数応答倍率 ( $X = -3 \text{ km}$ )

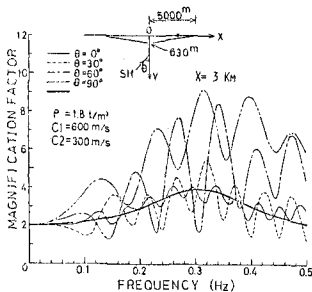


図-8 周波数応答倍率 ( $X = 3 \text{ km}$ )

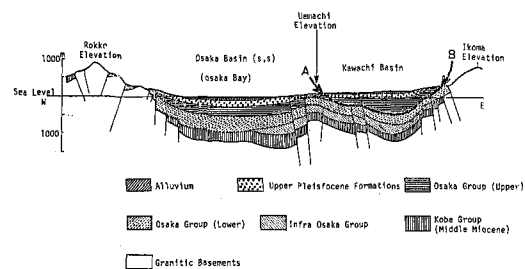


図-5 大阪平野断面図

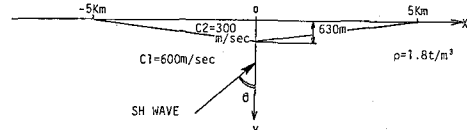


図-6 地盤モデル

この図から、入射角 $0^\circ$ と $30^\circ$ の場合は重複反射理論に基づく応答値の推定が可能であることが判明する。また、応答倍率の大きさに着目すれば、谷中央地点から±3km離れた地点でピーク値が出現している。したがって、地震時には表層厚の厚い所で加速度が最大値を取るわけではなく、地下の境界構造が、応答性に大きな影響を与えていることが判明する。

4番目のモデルは、阪神高速道路の北神戸線に予定されている前開付近の地盤をモデル化したもので、図-12にモデルが示されている。地盤定数は、土質と形成年代から推定<sup>(4)</sup>して表-5のようにした。表層は盤土であるのでせん断波速度を110m/secと190m/secの2通りの場合について解析した。ここでは断面の都合上前者の場合のみを示す。図-13, 14は表層厚が5mで、その下が半無限領域となっている、埋没谷側方の2地点における周波数応答倍率である。入射角は $0^\circ$ としている。図-13では重複反射理論による結果との差が大きく、振動数がわずかに違っただけで応答倍率が大きく変化する。これは地盤内における波動の散乱現象が極めて複雑であることを示している。一方、図-14は重複反射理論に基づく結果が良い推定値を与えることを示している。同じような境界面傾斜を持つ両地点で、周波数特性が、このような相異を示すことは、地盤の震動特性を明らかにするためには、地盤内の不整形性の詳細な検討が必要であることを意味している。図-15は1.66Hzにおける地表面応答倍率の分布である。入射角にかかわらず決まった地点で応答倍率がピークを示す。これは地層境界面の傾斜構造による波の集中・逸散現象が集約されて表われたものと解釈できる。図-16は同じく1.66Hzにおける地表面のせん断ひずみ分布を示したものである。これから、0m、20mおよび110m地点において、ひずみの値が大きくなるのがわかる。これは、半無限領域との境界面が傾斜している地点であり、ひずみの発生量も地下構造の構成に大きく依存するものであることが判明する。

#### 参考文献

- 1) F. J. S. - Sesma, J. A. Esquirol; BSSA, Vol. 69, pp. 1107-1120, 1979.
- 2) K. Toki, T. Sato; 3rd ICONMIG, Vol. 3, pp. 887-897, 1979.
- 3) N. Ikebe, J. Takemaka; Jour. Geosciences, Osaka City Univ, Vol. 13 Art. 4, P. 81, 1970
- 4) 田谷米辰雄・望月利男・松田馨余; 地盤と震害, 換書館, P. 50, 1977.

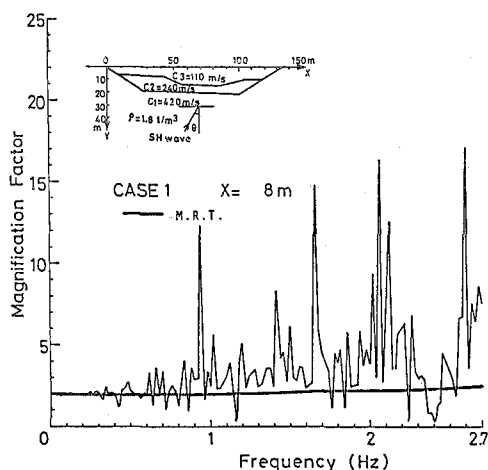


図-13 周波数応答倍率 ( $X=8m$ )

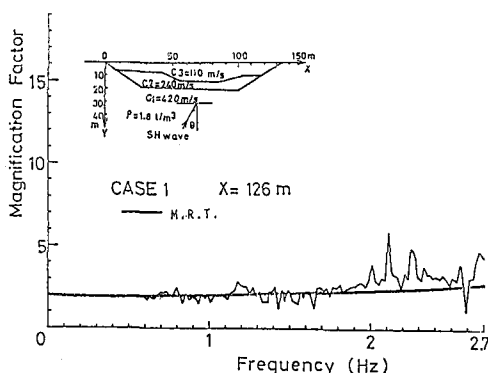


図-14 周波数応答倍率 ( $X=126m$ )

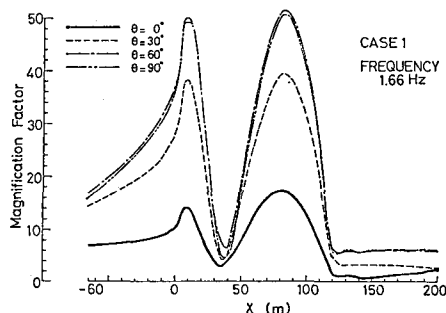


図-15 地表面応答倍率分布図

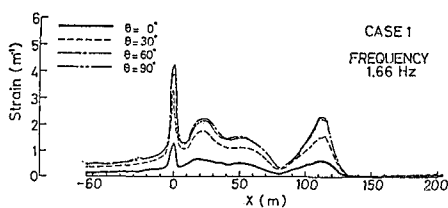


図-16 地表面ひずみ分布図