

(8) 長大構造物を対象とした地盤の動ひずみの推定法

東京卸工本技術研究所 小川 好

1. はじめに

地下埋設管、堤防、橋梁などの長大構造物や石油備蓄タンクといった巨大構造物の地震時挙動は、地盤の相対変位ないし動ひずみによって大きく左右されることは、多くの研究者によって指摘されている。地震時の地盤のひずみ ε は、地震波の伝播速度を C 、地震波の速度振幅を V とすると、理論的に

$$\varepsilon = V/C$$

(1)

によって表わされ、この関係式はしばしば用いられている。いくつかの地震について地下構造物のひずみを測定した例から、構造物のひずみと地震の速度振幅は比例することが知られており¹⁾、これは(1)の式が実際の地震についても成立していることと裏付けている。ここで問題となるのは伝播速度 C の評価であろう。従来、多くの場合、伝播速度 C として、対象とする地塊の地盤のS波またはP波速度を用いているが、論理的な根拠があるとは必しも言いがたい。

地盤にひずみを発生させる地震波を、Love波、Rayleigh波などの表面波に限定すれば、(1)式の C は表面波の伝播速度と考えられる。表面波の伝播速度は周期によって大きく変化する分散と呼ばれる現象をもつことから、伝播速度からたんに(1)式の C を定数として規定することはできない。しかし、表面波が地盤を伝播する際の卓越する周期を算定することができれば、この周期数での伝播速度を代表値として(1)式に適用しても、ひずみの推定法としては大きな誤まりはないものと思われる。ここでは、Love波、Rayleigh波による地盤の卓越周期を規定するいくつかの要因についての検討と、その結果得られた伝播速度 C を東京の下町、大岡山、京都の各地盤モデルを例にとって報告する。

2. 理論構成

表面波が成層構造をもつ粘弾性地盤を伝播するとき、振動が卓越する周期を規定する要因としては、およそ次の4つが考えられる。

- 1) 各周期数について、地盤内の変位、応力分布から求められる表面波の応答函数。
- 2) 地盤内の粘性減衰による増幅度の低下
- 3) 表面波の分散性による特定の周期での振幅の増大
- 4) 表面波の分散性による距離減衰の変化

このうち、1)の応答函数を求める方法としては、HarkriderのMedium Responseが知られている。(しかし、Medium Responseは短周期に偏るに(たがって)応答値が増大する傾向があり

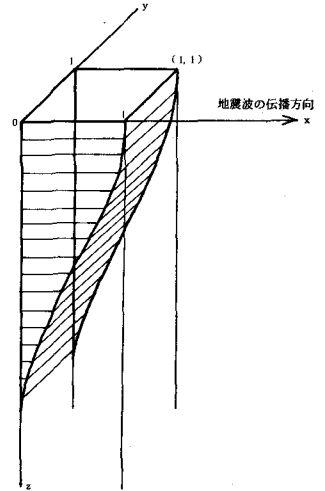


図-1

LIST OF INPUT PARAMETERS

LAYER NO.	THICKNESS	DENSITY	SHEAR WAVE VEL.	θ
1	10.00	1.63	120.00	10.00
2	30.00	1.58	100.00	10.00
3	5.00	1.69	400.00	30.00
4	5.00	1.80	500.00	30.00
5	250.00	1.90	500.00	30.00
6	100.00	1.90	600.00	30.00
7	100.00	1.90	650.00	30.00
8	1100.00	2.10	700.00	40.00
9	1400.00	2.20	1500.00	50.00
10	10000.00	2.50	3000.00	100.00

表-1

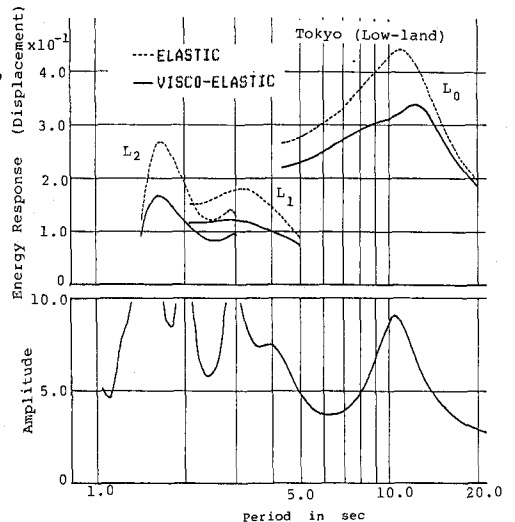


図-2

強震記録の卓越周期を必ずしも説明できるとは限らないこと²⁾から、筆者はエネルギー密度から応答函数を求めることを提案した。⁴⁾これは、図-1に示すような地表面で単位面積となる角柱の地盤が持つ運動エネルギーの1周期あたりの平均値(運動エネルギー密度)を E_A とおくと、地表での応答 R を

$$R = 1/\sqrt{E_A} \quad (2)$$

として定義したものである。Love波、Rayleigh波の E_A をそれぞれ E_A^L , E_A^R とすれば、

$$E_A^L = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^b \rho V_L^2 dz \quad (3)$$

$$E_A^R = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^b \rho V_R^2 dz \quad (4)$$

で与えられる。ここに ω は角振動数、 ρ は密度、 V_L , V_R はそれぞれLove波、Rayleigh波の地中変位、 b は V が0に収束する深度を示す。

2)の粘性減衰の影響として、表面波の減衰を示す量 Q_{surf} が計算できれば、 Q の定義式

$$\frac{1}{Q} = \frac{\Delta W}{2\pi W} \quad (5)$$

を用いて評価することができる。ここに ΔW は1周期の間に失われるエネルギー、 W はそのときの運動エネルギーである。表面波の応答函数として運動エネルギーの概念を用いていることから、(5)式を(2)式に代入することができ、粘性弾性地盤の応答としては、

$$R^* = \sqrt{1 + \frac{2\pi}{Q_{surf}}} \quad (6)$$

によって求めることができる。なお、S波、P波の減衰を示す量 Q_s , Q_p から Q_{surf} を計算する方法については、文献4にゆずる。

3)にあげた表面波の分散性による振幅の変化を計算する方法としては、Kelvinの停留値法、あるいは最急降下法によるものが典型的に有名である。⁵⁾これによれば地表の応答 U_0 は

$$U_0(x,t) = f^*(\omega_0) \sqrt{2\pi/x \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{U} \right)} \exp \left[i\omega_0 \left(t - \frac{x}{C(\omega_0)} \right) \pm \frac{\pi}{4} \right] \quad (7)$$

によって与えられる。ここで U は群速度、 C は位相速度、 $f^*(\omega_0)$ は地震波のフーリエ変換である。(7)式から群速度 U の変化が小さい周波数、すなわち群速度の極小値付近で分散性による振幅の増大が見られることになる。

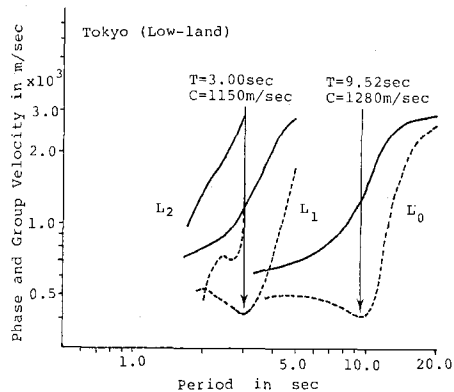


図 - 3

LIST OF INPUT PARAMETERS				
LAYER NO.	THICKNESS	DENSITY	SHEAR WAVE VEL.	μ
1	500.00	1.90	630.00	30.00
2	400.00	2.10	1000.00	40.00
3	650.00	2.10	1000.00	40.00
4	750.00	2.20	1400.00	50.00
5	*****	2.50	3000.00	100.00

表 - 2

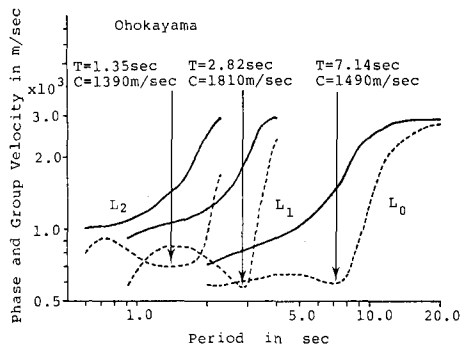


図 - 4

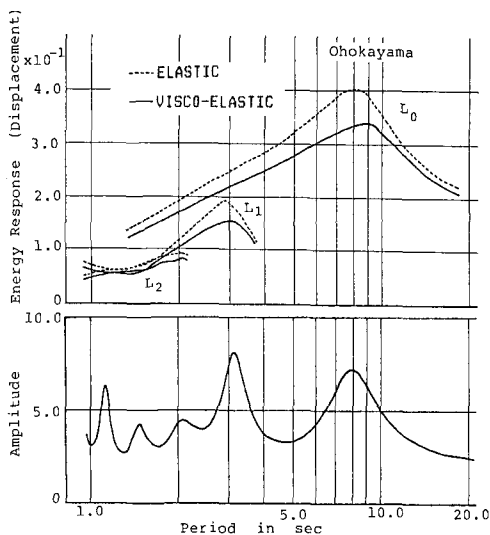


図 - 5

4)の分散性による距離減衰は、(7)式に見られるように $\sqrt{x}$ に比例する。
ただし、 $dU/d\omega$ が0となるときは(7)式は発散してしまうことから、エアリー相についての検討が必要となり $dU/d\omega$ が0となる ω での距離の減衰は $x^{3/2}$ に比例する⁵⁾。

以上の4要因についての結果から、伝播速度として代表される位相速度として、応答値が最大となる周波数と群速度が極小となる周波数までの位相速度Cを考えればよいことになる。

3. Love 波の計算結果

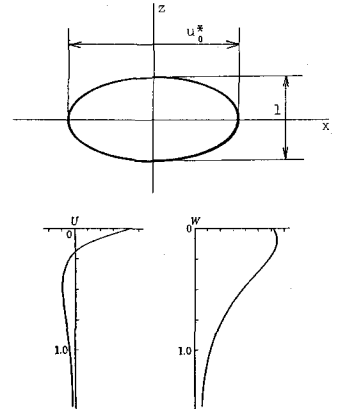
東京の下町の地盤(表-1)についての応答函数を図-2に、位相速度と群速度を図-3に示す。また大岡山の地盤(表-2)の計算結果から位相速度と群速度を図-4に、応答函数を図-5に示す。応答函数の図のうち上は運動エネルギー密度から求めたもの(Energy Response)であり、下は多重反射理論によるものである。東京の下町、大岡山とも、Love 波の応答と多重反射理論の応答とが一致を示している。

大岡山の地盤では、Seo, Kobayashi によって地震記録の解析結果が発表²⁾されている。その報告によると伊豆大崎近海地震では表面波と考えられる波が7秒付近で卓越している。今回の解析結果から、7秒付近でのピークはLove波によって説明できることが理解できる。また、群速度の極小値も7秒付近に存在している。

応答函数の最大値を示す周波数と群速度の極小値を示す周期を比較すると東京の下町、大岡山ともに応答函数の最大値の方が長周期側に存在する。この付近では周期の変化に伴う位相速度の変化が大きいため、両者の周期に対応する位相速度は必ずしも一致しない。基本モードについての結果は、東京の下町の地盤では群速度の極小値から求められる卓越周期 T は9.5秒、位相速度 C は1300 m/secであり、応答函数の最大値から求められる T は弾性地盤で11秒、粘弾性地盤で12.5秒、 C は弾性地盤で1890 m/sec、粘弾性地盤で2360 m/sec程度であった。また大岡山での結果からは群速度極小からの T は7.1秒、 C は1490 m/secであり、応答函数の最大値からの T は弾性地盤で8.7秒、粘弾性地盤で9.5秒であり、 C は弾性地盤で2080 m/sec、粘弾性地盤で2360 m/secであった。

応答函数のピークがなだらかで、群速度極小の周期での応答量と最大値がそれほど大きな差がないことと、 C を小さく見積った方が必ずみが大きくなり耐震計算上は安全側となることを考慮して群速度極小となる周期での位相速度を伝播速度とすると、必ずみえは東京の下町の地盤では $C = 0.0008V$ 大岡山の地盤では $C = 0.0007V$ 程度となる。

田沼米⁶⁾は2層構造の地盤モデルについての研究から、変位応答が極大となる周期 T_0 と群速度が極小となる周期 T_a はともに $1/4$ 波長法則が成立し、 σ と τ と表層の剛性率の比が大きくなるにしたがって互いに等しくなるとしている。この関係を多層から成る地盤に準用して考えると、硬い基盤の上に軟弱な地層が堆積している地盤ほど、応答函数の最大値と群速度極小の周期



Rayleigh 波の振幅の深さ方向の分布

図 - 6

Depth (m)	Thickness (m)	S-wave velocity (m/sec)	P-wave velocity (m/sec)	Density (g/cm ³)
2.0	2.0	100.0	250.0	1.8
4.0	2.0	160.0	860.0	1.8
7.0	3.0	195.0	860.0	1.9
10.0	3.0	195.0	1660.0	2.0
12.0	2.0	380.0	1660.0	2.0
13.0	1.0	200.0	1660.0	2.0
14.0	1.0	375.0	1660.0	2.0
17.0	3.0	375.0	1900.0	1.6
18.0	1.0	200.0	1900.0	1.6
28.0	10.0	430.0	1900.0	1.6
36.0	8.0	270.0	1900.0	1.7
180.0	144.0	370.0	1900.0	1.9
360.0	180.0	690.0	2060.0	2.0
380.0	23.0	1100.0	2600.0	2.1
		2800.0	4990.0	2.5

表 - 3

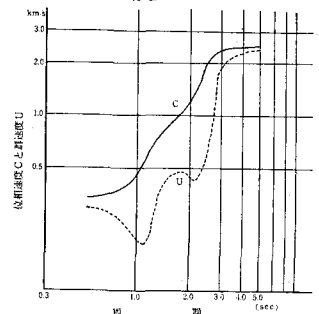


図-7 八戸での Rayleigh 波の位相速度と群速度

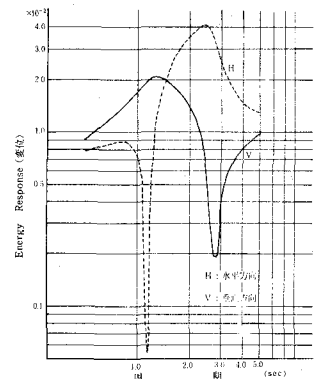


図 - 8

が近づき、その周期での応答が大きく卓越することになる。

4. Rayleigh 波の計算結果

図-6に示すように、Rayleigh 波では上下と進行方向の2つの成分を持つことから、その応答函数は複雑なものとなっている。八戸の地盤(表-3)の基本モードについて、群速度と位相速度を図-7に、上下と水平の応答函数(弾性解)を図-8に示す。これらの図にも見られるように、Rayleigh 波の群速度は同一のモードに2つ以上の極小値を持ち、それぞれの極小値の付近に水平と上下の応答函数の最大値が存在する。現在の段階では、上下と水平のどちらの成分に対応する位相速度をもって代表的な伝播速度とすべきであるが決定することはできない。今後、実験結果との対応などから解明していくつもりである。なお、八戸の地盤についての計算結果も参考までにあげると、群速度極小の周期での位相速度は基本モードで 1450 m/sec と 550 m/sec 、応答函数が最大となる周期での位相速度は水平成分で 1960 m/sec 、上下成分で 690 m/sec であった。

後藤らはRayleigh 波による地盤のひずみを京都市域で推定した結果、最大速度と最大ひずみとの間に直線的な関係が見られ、この直線の傾きから得られる伝播速度は山地部の地盤ではおよそ 1400 m/sec 、他の地域ではおよそ 600 m/sec と仮定している。このときの地盤モデルと同一のモデルについて、Rayleigh 波の群速度と応答函数の計算結果を図-9に示す。群速度の極小値の周期での位相速度は山地(Site 10)では 1500 m/sec 、他の地盤では 840 m/sec と 770 m/sec となっており、後藤らの結果とほぼ同一の値となっている。

謝辞 この研究に多大のご助力をいただいた生産技術研究所 片山恒雄、群馬大学 菅田 功司助教授、埼玉大学 小沢昭三教授に感謝いたします。また、資料等についてご教唆いただいた京都大学 杉戸英太氏に感謝いたします。参考文献 1)久保良三郎 長大構造物の地震動災害とその防止に関する研究 2) Seo et al. On the Rather Long-Period Earthquake Ground Motion due to Deep Ground Structure of Tokyo Area. 3) 後藤 他 埋設管の震害予測のための地震動の推定法について。4) 小川 好 表面波による粘弾性地盤の地震応答の研究 5) 佐藤泰雄 弾性波動論 6) 田沼本鏡二 2層構造におけるLove波の振幅分

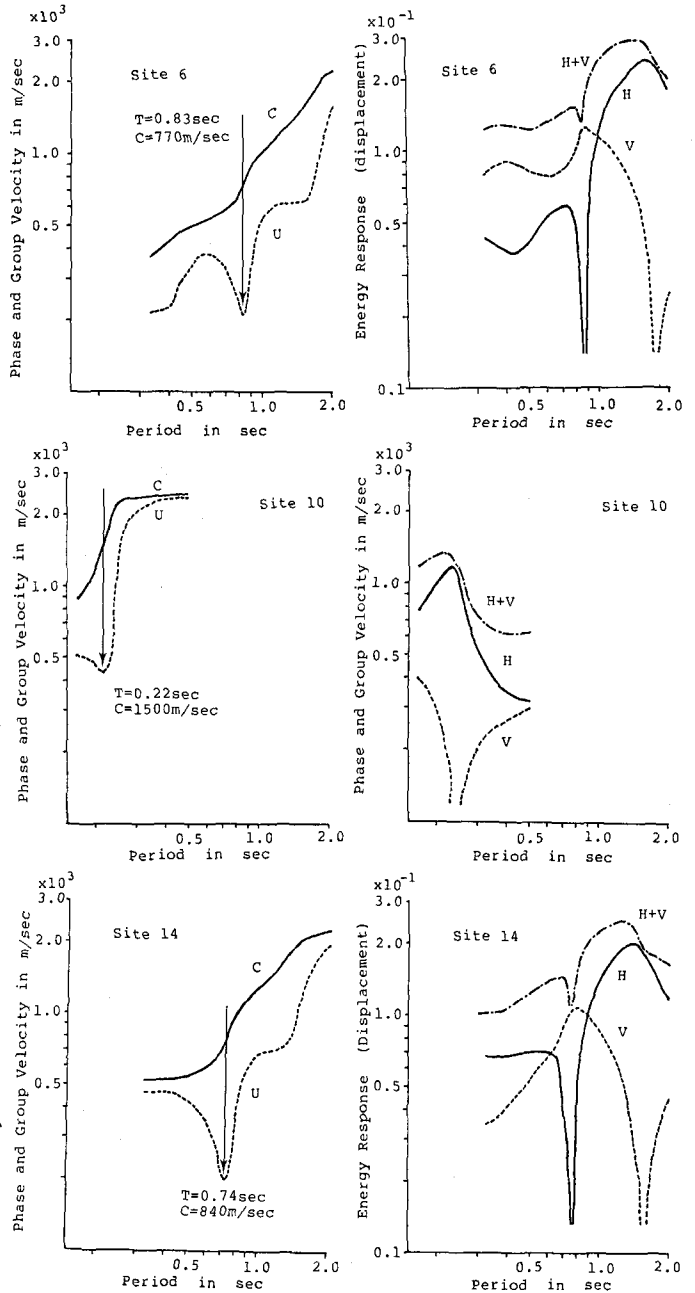


図 - 9