

# 地下構造物と地震動の関係について

## 強震記録から地下構造物に被害をもたらす 地盤ひずみを算定する方法

鈴木崇伸<sup>1</sup>

<sup>1</sup>東洋大学工学部教授  
(〒350-8585埼玉県川越市鯨井2100)  
E-mail:suzuki@eng.toyo.ac.jp

地下構造物の耐震性評価には、振幅と波長を工学的にモデル化した地盤振動が仮定されることが多いが、既設のメンテナンス・補強のための耐震性評価となると、過度の安全余裕は不経済となり、現実に見合った地盤振動モデルが必要とされる。またリアルタイム地震防災の点からも、地盤データベースとあわせて、強震記録から地盤ひずみが算出できることが期待されている。これらの観点から、本研究は、地盤振動モデルと地盤ひずみの関連性について分析している。この報告では、地中のひずみの周波数特性と増幅特性、Love波のエアリー相の周期と波長を計算する近似式について述べている。最後にこれらの活用例について示している。

*Key Words : Ground strain , Strong motion , Underground Structure ,*

### 1. はじめに

埋設管やトンネルなどの地中構造物は地盤の変形に追従することが知られており、その耐震性能評価には、振幅と波長を工学的にモデル化した地盤振動が仮定される。鉛直軸に沿った 1/4 波長則や、水平軸にそった調和平均波長は多くの設計指針で採用されている簡易な地盤振動モデルである。一方でパソコンや解析ソフトの普及から、動的解析が一般化しており、簡易な振動モデルによる評価結果と整合しないケースもありうる。設計式だからということで安全余裕を十分見込んであるのは首肯されるが、既設のメンテナンス・補強のための耐震性評価となると、過度の安全余裕は不経済となり、現実に見合った地盤振動モデルが必要とされると考える。

最近では多数の強震データが大地震発生後に収集され、公開されるようになってきた。震度、最大加速度、SI 値などは被害との対応を見るのによく用いられる地震動尺度であるが、地中構造物の被害と対応する尺度となると、明確にっていないのが現状である。地盤データベースとあわせて、強震記録から地盤ひずみが算出できれば、地中構造物被害と対応のよい尺度になることが期待される。

以上の 2 つの観点から、本研究は、地盤振動モデルと地盤ひずみの関連性について分析している。こ

の報告では、地中のひずみの周波数特性と増幅特性、Love 波のエアリー相の周期と波長を計算する近似式について述べている。最後にこれらの活用例について示している。

### 2. 強震記録の周期特性

地震被害と対比する場合には、主として強震データの振幅の情報が抽出されている。最大加速度は加速度データの最大値であり、計測震度は周波数調整した加速度振幅の順列値から求められる。また SI 値は一定の周期帯域 (0.1 秒 ~ 2.5 秒) の応答速度の平均値として計算される。地盤ひずみを算定するには、振動モードを確定するために、周期の情報が不可欠である。

周期特性を見るには、通常、周期ごとあるいは周波数ごとに振幅を計算し、最大振幅を特定する方法が用いられる。フーリエスペクトル、応答スペクトルの計算がこれらに該当する。一方、スペクトル計算を行わなくても、ゼロクロス時間からも周期の情報を取り出すことが可能である。

最近では、地盤の固有周期をもとめるのに H/V スペクトルがよく用いられている。水平方向の波形のスペクトルと鉛直軸方向の波形のスペクトルの割り算を行うと伝達関数の近似となるスペクトルが得ら

れる方法で、微動の分析だけでなく、強震記録の分析にも用いられている。本研究では強震記録から得られる周期情報として、 $H/V$  スペクトルのピーク周期に着目をする。図-1 に  $H/V$  スペクトルの計算例を示す。2004 新潟県中越地震、KNet 小千谷観測点の計算結果で、横軸は周期としている。地点の特性をひとつのグラフで表すために、水平 2 成分のフーリエスペクトルの平均を鉛直成分のフーリエスペクトルで除している。多くは単峰型となるが、複数のピークをもつ場合も少なくない。今回は単純にピークの最大値に注目する。 $H/V$  スペクトルの形状と地点の振動特性の分析は今後の課題である。

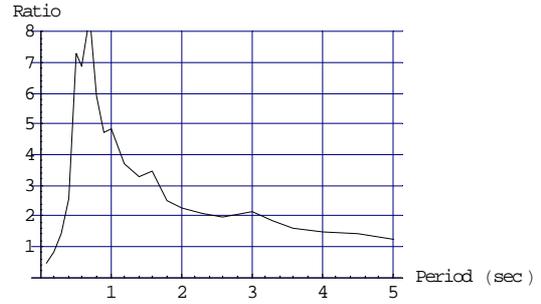


図-1  $H/V$  スペクトルの計算例 (2004 新潟県中越地震, KNet 小千谷観測点)

### 3. 地盤の伝達関数から得られる情報

$H/V$  スペクトルから求められる地盤固有周期を活用する方法を考察する。双峰形の分布もあるがここでは簡単のために、最大のピークだけに注目して分析する。複雑な地層構造を基盤と表層の 2 層地盤で考える。

図-2 に 2 層地盤の地盤モデルを、また図-3 に伝達関数を示す。図-3 はインピーダンス比を  $1/3$  としたときの計算結果である。減衰を考えていないため、 $1 \sim 1/\kappa$  ( $\kappa$  はインピーダンス比) の間で周期的に変化する関数となる。減衰を考える場合には高次モードのピークが小さくなっていく。1 次モードのピーク位置は

$$\frac{\omega H}{V_s} = \frac{\pi}{2} \quad (1)$$

で求められる。周期に直せば、設計でよく用いられる地盤固有周期の計算式となる。

$$T_g = \frac{4H}{V_s} \quad (2)$$

また伝達関数の最大値と最小値の比率はインピーダンス比の逆数となることが理論的にはいえる。

次に地中のひずみの増幅を考える。地盤モデルは図-2 を用いることとすると、地表の振幅を  $u_s$  としたときの波動方程式の解は

$$\begin{aligned} v_1 &= u_s \cos\left(\frac{\omega(H-z)}{V_s}\right) \exp(i\omega t) \\ v_2 &= u_s \left\{ \cos\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) \cos\left(\frac{\omega z}{V_b}\right) + \frac{\rho_s V_s}{\rho_b c_b} \sin\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) \sin\left(\frac{\omega z}{V_b}\right) \right\} \exp(i\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。2 つの式から表層と基盤層のひずみ振幅が計算でき、それぞれに添え字 1,2 をつけて表すと、

$$\gamma_1 = \frac{u_s \omega}{V_s}, \quad \gamma_2 = \frac{u_s \omega}{V_b} \sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \kappa^2 \sin^2\left(\frac{\omega H}{V_b}\right)} \quad (4)$$

となる。比率 (ひずみの伝達関数) を計算すると

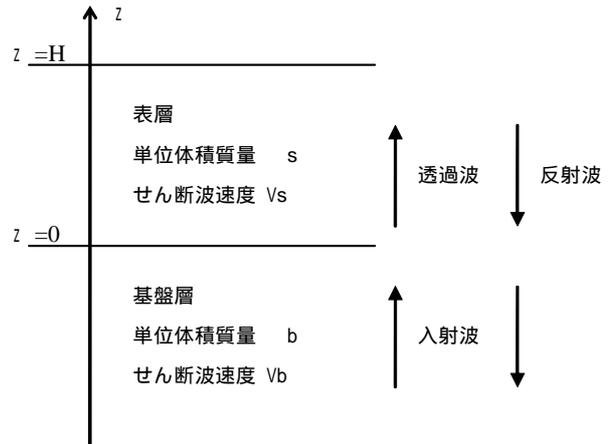


図-2 ひずみの増幅関数の計算モデル

$$H_\gamma = \frac{V_b/V_s}{\sqrt{\cos^2\left(\frac{\omega H}{V_s}\right) + \kappa^2 \sin^2\left(\frac{\omega H}{V_b}\right)}} \quad (5)$$

となり、この関数は前述の伝達関数と相似となる。すなわち、表層地盤の固有振動数付近でひずみが増幅されやすいといえる。この振動数付近ではひずみはせん断波速度比に応じて増幅される。

鉛直方向に伝播する波動の場合には、伝達関数で増幅特性が説明できるが、2 層地盤を仮定した場合には、地表に沿って伝播する表面波も同じパラメータから計算できる。位相速度を  $c$  としたときのラブ波の計算結果は、

$$\begin{aligned} v_1 &= u_s \cos\left((H-z)\omega \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \frac{1}{c^2}}\right) \exp\left(i\omega t - i\frac{\omega}{c}x\right) \\ v_2 &= u_s \cos\left(H\omega \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \frac{1}{c^2}}\right) \exp\left(-z\omega \sqrt{\frac{1}{c^2} - \frac{1}{V_b^2}}\right) \exp\left(i\omega t - i\frac{\omega}{c}x\right) \end{aligned} \quad (6)$$

となる。ラブ波の位相速度  $c$  の方程式は、

$$\tan\left(\omega H \sqrt{\frac{1}{V_s^2} - \frac{1}{c^2}}\right) = \frac{\rho_b \sqrt{V_b^2 - c^2}}{\rho_s \sqrt{c^2 - V_s^2}} \quad (7)$$

であり、ラブ波群速度  $U$  の極小を決める方程式は、

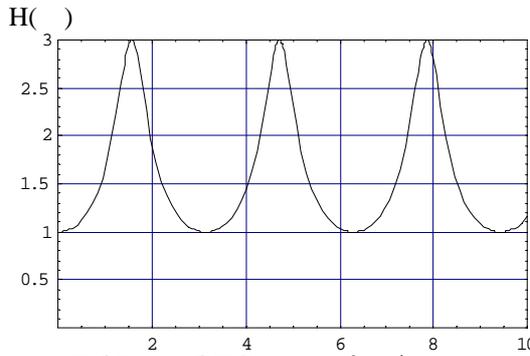


図-3 2層地盤の伝達関数 (インピーダンス比 = 1/3)

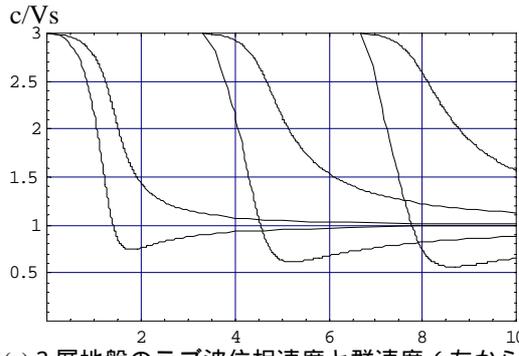


図-4(a) 2層地盤のラブ波位相速度と群速度 (左から 1次, 2次, 3次, インピーダンス比=1/3)

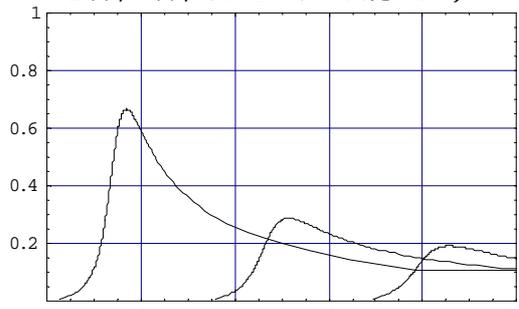


図-4(b)ラブ波の振幅関数 (左から 1次, 2次, 3次, インピーダンス比=1/3)

$$\frac{dU}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{c}{1 - \frac{\omega}{c} \frac{dc}{d\omega}} \right) = 0 \quad (8)$$

となる。

図-4(a)は2層地盤のラブ波の位相速度と群速度を計算した結果であり、群速度の極小位置が伝達関数のピークにおよそ一致しているのがわかる。モードの次数によってラブ波の振幅関数を計算することができる。計算結果を図-4(b)に示している。高次モードほど振幅は小さくなるが、1次モードの最大振幅となる振動数は伝達関数のピーク位置におよそ一致する。

地盤固有周期の条件は、鉛直方向に伝播する波動においても水平方向に伝播する波動においても、振幅が大きくなる特性がある。H/V スペクトルのピークから決まる周期の条件は、サイトごとの地震動を詳細に分析するてがかりになる。

#### 4. 群速度が極小となる条件の振動数と速度

前述の分析で、伝達関数がピークとなる振動数と群速度の極小となる振動数はおよそ一致するとしたが、ここではもう少し詳細に分析してみる。表層と基盤のせん断波速度の比率が小さい場合には全反射となる臨界角も小さくおよそ一致するが、比率が大きくなると臨界角も大きくなり、一致しなくなる。ここでは数値計算結果を回帰して、ラブ波の群速度が極小になる周期と位相速度の近似式を作成する。

H/Vs 群速度が極小になるときのラブ波の振動数の1次近似式として、表層のせん断波速度を臨界角  $\alpha_{cr}$  の余弦でわった

$$\frac{\tilde{\omega}H}{V_s} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\cos \alpha_{cr}} = \frac{\pi}{2} \frac{1}{\sqrt{1 - (V_s/V_b)^2}}, \quad \text{ただし } \sin \alpha_{cr} = \frac{V_s}{V_b} \quad (9)$$

を考える。図-5(a)は数値計算によって求めた群速度が極小となる無次元化した振動数と、上述の1次近似式で計算した結果のプロットである。横軸が真値、縦軸が推定値となっている。両者はよい比例関係となるのがわかる。せん断波速度比を0に近づけたときともに  $1/2$  になることを考慮した線形回帰式は

$$\frac{\tilde{\omega}H}{V_s} - \frac{\pi}{2} = 0.50 \left( \frac{\omega H}{V_s} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

となる。整理をして、群速度が極小になるときのラブ波の振動数は、

$$\frac{\omega H}{V_s} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{2.0}{\sqrt{1 - (V_s/V_b)^2}} - 1 \right) \quad (11)$$

H/Vs と計算できる。これを周期に直すと、

$$T = \frac{4H}{V_s} \frac{1}{\frac{2.0}{\sqrt{1 - (V_s/V_b)^2}} - 1} \quad (12)$$

となる。

次にこの周期におけるラブ波の位相速度を考える。図-5(b)はせん断波速度比を変化させたときの、位相速度の数値計算結果をプロットした結果である。群速度が極小になるときの位相速度はせん断波速度比の逆数  $V_b/V_s$  と比例関係となり、グラフ中に示した回帰線が計算される。ここで、 $V_b/V_s=1$  となるときに  $c/V_s = 1$  となる条件を加味すると、以下の群速度が極小になるときの位相速度  $c$  の近似式が得られる。

$$c = 0.68V_s + 0.32V_b \quad (13)$$

共同溝設計指針などでは表層と基盤層の波長の調和平均をとる方法が採用されているが、位相速度として式で表すと、

$$c = \frac{2V_b V_s}{V_s + V_b} \quad (14)$$

となる。図-7 に両者の比較を示すが、 $1 < V_b/V_s < 3$

の範囲ではおよそ一致するが、3 以上では、調和平均をとる方法は位相速度を小さく計算する。その結果、波長は短く算出されることになり、ひずみは大きく算定される。観測結果による実証的な分析が必要であるが、今回提案する式は設計面への応用も可能と考える。

### 5. 地盤ひずみの計算例と考察

4 章の分析をもとに、地盤ひずみの試算を行ってみる。2004 新潟県中越地震の防災科学技術研究所の K-Net データを用いて計算を行う。表-1 に計算結果を示すが、最大加速度 PGA は水平成分を 8 方向に合成した最大値、最大変位 PGD は、同じく 8 方向に合成した加速度波形を直接積分した最大値である。地盤固有周期  $T$  は 2 章で述べた  $H/V$  スペクトルのピーク周期である。AVS20 は公開されているボーリングデータから求めた地表 20m までの平均  $S$  波速度であり、 $c$  は式 (13) による位相速度の計算値、 $L$  は周期と位相速度から求まる波長、 $\epsilon$  は変位と波長から求めたひずみである。なお、基盤の  $S$  波速度は 600m/s として計算している。

AVS20 は 200m/s から 400m/s の値となり、津南がもっとも硬い地盤となっている。基盤の  $S$  波速度を 600m/s としているために、位相速度  $c$  は 500m/s 前後の値となっている。計算された波長は 200m から 1400m ばらついているが、これは主として、地盤固有周期の影響が大きく、津南、柏崎で大きな値となっている。またひずみは、 $PGD$  の影響が大きく、小千谷で最大となっている。ラフな計算ではあるが小千谷と長岡では、地盤ひずみレベルが 0.3% を超え、地下埋設物への大きかったことが推察される。この計算式によれば、地盤固有周期が短い地盤で大きな変位が生じた場合に、ひずみが大きくなり、地下構造物に影響が大きいことになる。分析対象を拡大して、今後研究を進めるとともに、アレイ観測結果の分析からエアリー相の影響を定量化する予定である。

謝辞

防災科学技術研究所の K-Net データを使用させていただきました。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：K-Net データ
- 2) 日本道路協会：共同溝設計指針
- 3) 力武常次他：物理数学，学会出版センター

表-1 地盤ひずみの計算結果

観測点	PGA Gal	PGD cm	T sec	AVS20 m/s	c m/s	L m	$\epsilon$ %
小千谷	1502	24.7	0.7	237	484	339	0.46
長岡	541	10.6	0.4	280	498	199	0.33
小出	646	9.1	0.5	305	506	253	0.23
十日町	1713	6.6	0.4	390	533	213	0.19
津南	437	6.4	2.6	409	539	1401	0.03
柏崎	154	8.2	2.0	217	477	955	0.05

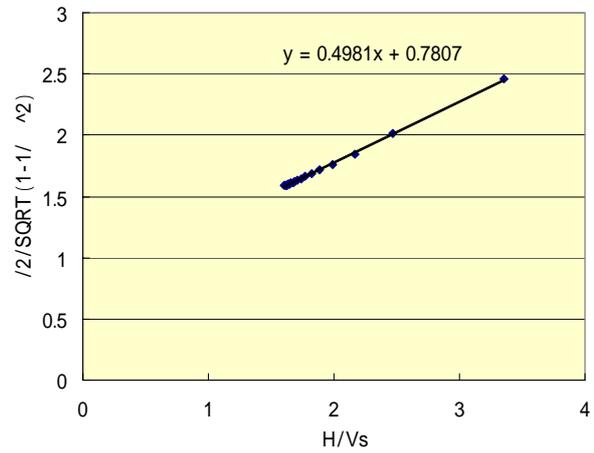


図-5(a) Love 波 1 次モードの群速度が極小となる振動数の近似計算

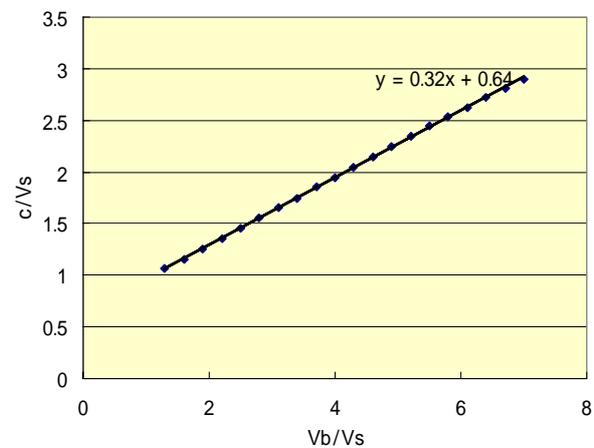


図-6(b) Love 波 1 次モードの群速度が極小となるときの位相速度

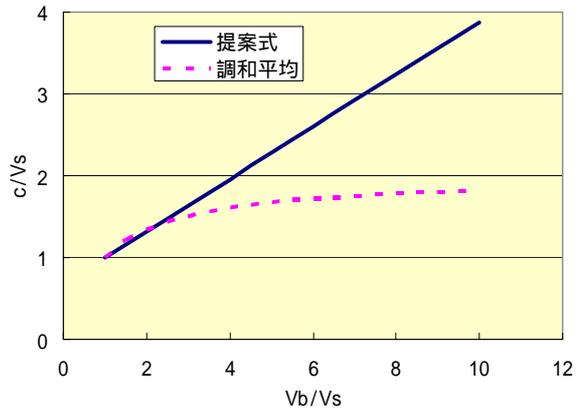


図-7 調和平均による位相速度と提案式の比較