

(29) 常時微動の応答スペクトルを利用した地盤表面層の減衰定数評価法

金沢大学工学部 正会員 北浦 勝・同 正会員 ○池本 敏和

1. はじめに

地震による被害と局所的な地盤の動特性との関係が、多くの研究者によって論じられている。周知のように、地盤の動特性には固有周期、減衰定数、せん断波速度、間隙水圧などの地盤条件が影響を及ぼしあっている。これらの地盤条件を綿密に測定しようとする、多大な労力と費用を有する。ところで、地盤の震動を取り扱う方法には波動論と振動論とがある。両者を比較してみると、前者には地盤動特性のパラメタを詳細に検討できるという特徴があるが、後者には地盤動特性のパラメタが固有周期と減衰定数などと簡単のため、解の見通しが得やすいという利点があろう。これまでの研究により地盤の固有周期に関しては比較的正確に推測できるが、減衰定数に関しては推測が困難であるので、地盤の地震応答解析では減衰定数を仮定している場合も少なくない。本研究では簡単のために地盤震動を振動論的に取り扱い、常時微動の応答スペクトルを考えることによって地盤の減衰を評価しようと試みた。次に、本手法の精度を検討するために、本手法を固有周期、減衰定数の既知な模擬常時微動波形に適用した。また、福井平野における常時微動の測定記録から地盤の減衰定数を求め、考察を加えた。

2. 応答スペクトルを用いる地盤の減衰定数評価法

本手法においては地盤を線型1自由度系と仮定し、常時微動の速度応答スペクトルと、後述する方法で求まる地表面加速度の速度応答スペクトルとを比較することによって、地盤の減衰定数を評価する。

Fig. 1に本手法のフローチャートを示す。比較の対象となる地表面加速度を求めるための基盤からの入力 $x(t)$ をホワイトノイズと考える。次式のように一定の確率密度を有する確率変数から取り出された振動数を持つ余弦関数を、時間軸上でランダムにずらしたものを重ね合わせてホワイトノイズを作成した。

$$x(t) = \alpha \cdot \sum_{n=1}^N \cos(\omega_n t + \phi_n) \quad (1)$$

式(1)における α は定数である。ここでは時間刻みを0.02 sec, N を1024としている。つまり20.48 sec の記録を作成した。これを数種の減衰定数を持つ1自由度系に入力させ、その応答加速度として地表面加速度を得た。従って、ここでは常時微動のパワースペクトルの平均を $a=1$ なる地表面加速度のパワースペクトルの平均で除し、その平方根を改めて係数 α とする。係数 a を地表面加速度に乘じることによって常時微動と地表面加速度の振幅レベルを等しくした。以上のようにしたのち、後述の方法のそれぞれに対して地盤の減衰定数を求めた。なお、

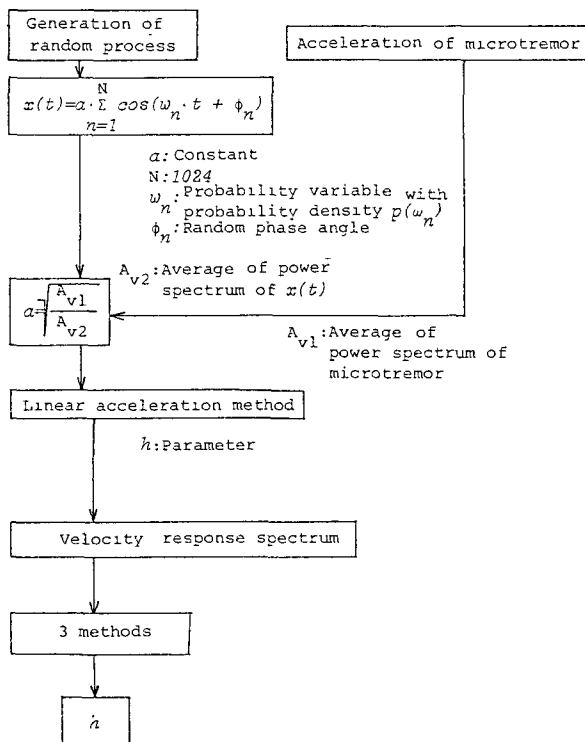


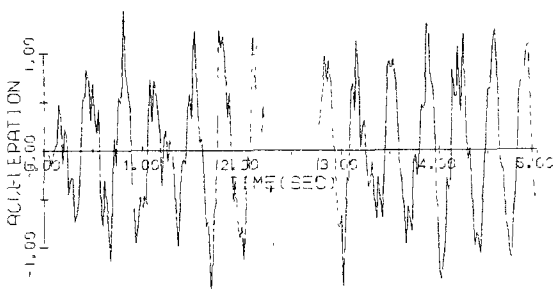
Fig.1 Flow chart

常時微動波形の時刻歴と地盤の固有周期を 0.3秒、地盤の減衰定数を0.05としたときの応答スペクトルはFig. 2の如くなる。ただし、ここでは応答スペクトルの減衰定数は10%一定としている。

速度応答スペクトルを用いて減衰定数を評価する方法は次の3方法とし、それぞれについて検討を行った。① 自乗平均が最小となる方法：常時微動の速度応答スペクトルと地表面加速度での速度応答スペクトルとの差の自乗平均を全周期に対して求める。このとき減衰定数をパラメトリックに変化させ、自乗平均が最小となる減衰定数を地盤の減衰定数とする。② 面積の差が最小となる方法：常時微動の速度応答スペクトルの面積と減衰定数を変化させた地表面加速度の速度応答スペクトルの面積との差が最も少なくなる減衰定数を地盤の減衰定数とする。③ 変動係数が最小となる方法：常時微動の速度応答スペクトルを地表面加速度の速度応答スペクトルで除し、そのとき求まる各周期ごとの値に対して平均と分散を求め、変動係数を決定する。この操作を行い、減衰定数を変化させて、最もバラツキ具合が少ない、すなわち変動係数の小さい減衰定数を地盤の減衰定数とする。

地盤の減衰定数を 0.05, 0.1と仮定して作成した模擬常時微動波形を用いて、これら3とおりの方法の妥当性を検討する。結果をFig. 3に示す。横軸の h_a は仮定した値であり、縦軸の h_c は3方法によって与えられた値である。図中、傾きが45°に近いほど評価法の精度が良いことになる。また方法②、③と方法①を比較してみると方法②では求まる減衰定数が小さい傾向にあり、方法③においては45°の傾斜に沿う点もあるが全体的なバラツキは大きい結果となっている。これらの理由として方法②では模擬常時微動波形と地表面加速度の速度応答スペクトルのピークとなる周期やその形状が異なる場合にも、面積が同一であれば h が求まり、十分正確な評価がなされていないからであると考えられる。また、方

法③では減衰定数をパラメトリックに評価していく段階において、地表面の速度応答スペクトル値を模擬常時微動のそれで除しているため、仮定した減衰定数に近くなってくると数値が小さくなり計算機の精度に支障をきたすためではないかと思われる。従って、この結果より多少低く評価されるが、バラツキ具合が少ない方法①（自乗平均が最小となる方法、Fig. 3中の△印）が比較的良好ではないかと考えられる。これまで述べてきた評価手法では全て速度応答スペクトルを対象としてきた。次に、加速度応答スペクトルを対象とした地盤の減衰定数を求め、速度応答スペクトルの結果との比較検討を行う。なお、加速度応答スペクトル



(a) Time history

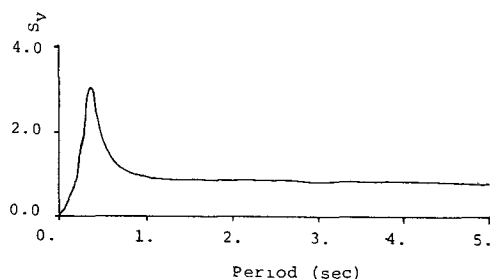


Fig.2 (b) Velocity response spectrum

h_a : Assumed damping ratio

h_c : Calculated damping ratio

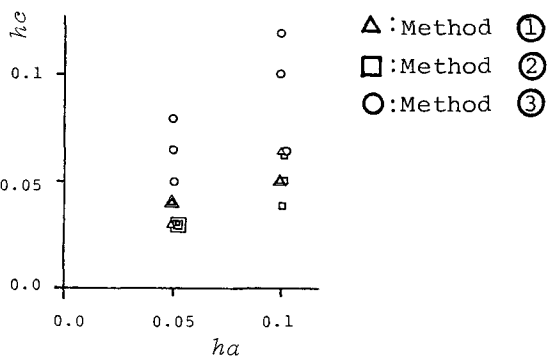


Fig.3 Relationship between h_a and h_c evaluated from 3 methods

ルを用いる方法においても速度応答スペクトルの場合と同様の理由で方法①が優れていたため、以下においては方法①に注目する。速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルを用いる手法を比較した結果はFig. 4の如くとなる。速度応答スペクトルと加速度応答スペクトルのそれぞれから求まる減衰定数を比較すると、良く似た傾向を示し、両者とも仮定した減衰定数の値より求まるそれがいくぶん小さめの値となった。また仮定した減衰定数が 0.05, 0.1 とでは、0.05の方が良く評価できる。この理由については現在検討中である。結果から、加速度応答スペクトルを対象とした評価手法が速度応答スペクトルを対象とした評価手法と比べて、いくぶん良いのではないと思われる。そこで、加速度応答スペクトルを対象とした手法に対して、以下考察していく。

まず、模擬常時微動波形を作成するときに仮定する地盤の固有周期が本手法を用いて減衰定数を評価する際、その精度とどのように関わっているかを考える。そのために固有周期をパラメタとして表し直したのがFig. 5である。固有周期1 secの模擬常時微動波形については若干大きい減衰定数となったが、ほかの模擬常時微動波形についてはバラツキも少なく、ほぼよい評価が行われているといえる。このことは考えられる地盤振動の周期領域において、本手法を適用しても良いということを示している。

次に、本手法を用いて実際の地盤での減衰を求め、検討する。

3. 福井平野における減衰定数

本手法を用いて福井平野で測定した常時微動記録の減衰定数を求めた。Fig. 6に測定地点を示す。解析では水平成分のみを扱った。ここで本手法で得られる減衰定数の意味を考える。地震時における基盤からの入射波に対する地表層での減衰を等価な減衰定数に置換してまとめて表すと次式のようなろう。

$$h = h_{\eta} + h_h + h_d \quad (2)$$

ここに、 h_h : 地表層の履歴減衰、 h_d : 地表層から基盤への逸散減衰、 h_{η} : 地表層の内部減衰である。すなわち地震時には式(2)における h_{η} , h_d , h_h が同時に作用する。しかし常時微動時には基盤

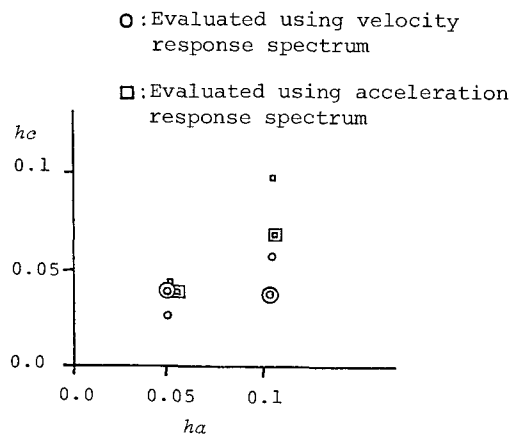


Fig.4 Relationship between h_a and h_c using velocity and acceleration response spectra

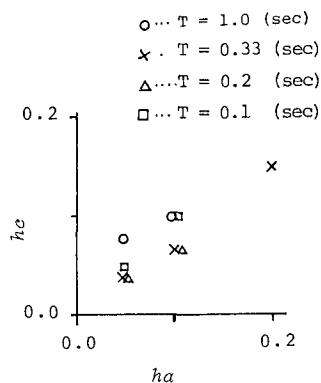


Fig.5 Effect of period on evaluation of damping ratio h_c

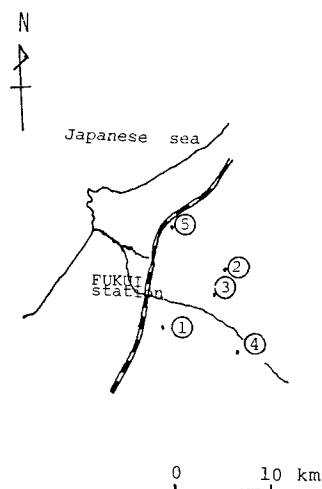


Fig.6 Measured sites

からの入力小さく、地盤が線形範囲の挙動をするため h_n は含まれないと考えられる。結局、常時微動の h は式(3)で表される減衰を示していると思われる。

$$h = h_n + h_d \tag{3}$$

本手法で求まる減衰定数を理論及び室内実験から求められた減衰と比較する。そのために本手法で求まる減衰定数と、文献1)にある逸散に基づく地盤の震動減衰と等価な地盤の内部減衰、及び文献2)の応力-ひずみ曲線に依存する履歴減衰とを比較する。文献1)にある等価な地盤の逸散減衰は、ボーリング柱状図から得られる基盤と地表層のインピーダンス比がわかれば求められる。基盤におけるせん断波速度、単位体積重量は普通よく用いられている値、すなわちそれぞれ500 m/sec、2.2 g/cm³と仮定した。また、地表層のそれらは各層におけるN値、土の種類を用いて算定し、各層の厚さを重みにとって決めることができる。履歴減衰は、地震が起こった時のせん断ひずみをみかけ速度40m/secとして求め、龍岡らが提案している応力-ひずみ曲線にそれを適用することによって求まるこのとき正弦波に換算するためにせん断ひずみ振幅は不規則波の0.5倍を採用した。これらの結果をTable 1に載せる。このとき表面波加速度の卓越周期は常時微動から求まる地盤のそれと一致させている。表によると、等価な逸散減衰定数は履歴による減衰定数と比較して大きな値となっている。また、本手法で求まる減衰定数は等価な逸散減衰と同程度のオーダーであることが明らかとなった。このことは本手法が地盤の減衰性を評価する上で、工学的にかなり有用であることを意味しているものと考えられる。

Table 1 Damping ratio in FUKUI plain

Sites	Acceleration response spectrum	Damping ratio due to dissipating energy	Damping ratio due to hysteresis curve
1	0.07	0.18	0.04
2	0.15	0.22	0.05
3	0.10	0.11	0.04
4	0.20	0.23	0.05
5	0.25	0.29	0.05

上述してきたことは基盤からの入力ホワイトノイズと仮定した場合のことである。しかし、振動源にある特定の人工や自然の影響が基盤まで伝わっている場合には、入力はかならずしもホワイトノイズと仮定することはできず、ある特定の周期成分が卓越していると考えられる。このような場合についても今後は検討していく予定である。

4. まとめ

- 本研究で得られた成果をまとめると次のようである。
- (1) 常時微動の加速度波形を利用し、応答スペクトルの概念を導入することにより、地盤の減衰定数を定量的に知る手法を提案することができた。
 - (2) 本手法における3通りの評価方法を比べた結果、「自乗平均による方法」が最もバラツキが少なく良いことが明らかとなった。
 - (3) 応答スペクトルとしては加速度応答スペクトルを用いるのがバラツキが少なく良いことがわかった。
 - (4) 本手法で求まる地盤の減衰定数は等価な逸散減衰定数と同程度のオーダーである。

謝辞

本研究を実施するにあたり、始終御指導を承った本学部・小堀為雄教授、ならびに多くの助言を頂いた宮島昌克助手、数値計算を全面的に手伝って頂いた元学部生・清水政浩君（現・セキサン工業）に深く感謝の意を表します。

参考文献 1) 土岐憲三：構造物の耐震解析, p.101 . 1981.
2) 岩崎敏男・龍岡文夫・高木義和：広範囲な歪領域での砂の動的せん断変形特性, 土研資料, 第1080号, 1976.