

(25) 地盤物性の不均質性が地盤の応答へ及ぼす影響に関する一検討

佐藤工業(株) 正員 ○末富 岩雄

“ “ 中村 晋

1. はじめに

表層地盤における地震動の増幅特性は、従来地盤構造を水平成層と見なしたS波重複反射理論により求められている。しかしながら、地盤は基盤の傾斜や崖地形等の不整形性および地盤物性の空間的揺らぎによる不均質性を有している。増幅特性の重要な因子であるQ値については、従来より室内試験ではQ値は周波数依存性を示さず(履歴型)¹⁾、鉛直アレー地震記録では、加速度レベルが小さく地盤物性が線形範囲にある記録を用いた場合Q値は周波数依存性を示し^{2) 3) 4)}、加速度レベルが大きく地盤が非線形状態にある場合にはQ値は周波数依存性を示さなくなる⁵⁾ことが報告されている。Q値が周波数依存性を示すしくみについては、香川・澤田⁶⁾は一次元波動論を用いて、拘束圧の影響を考慮して深部地盤構造の層分割を増すことにより、Q値の周波数依存性を表現できることを指摘している。和泉⁷⁾は散乱波の一次元状態方程式を用いて、佐藤・川瀬⁸⁾は二次元有限要素法を用いて、地盤全体の減衰は内部減衰と地盤の不均質性による散乱減衰の和で表され、Q値の周波数依存性は散乱減衰によるものであることを示している。

本報告では、まず、地盤物性の揺らぎが地盤の伝達関数へ及ぼす影響を、一次元重複反射理論と二次元有限要素法の比較を行いながら検討する。さらに、Q値の周波数依存性と地盤物性の揺らぎや内部減衰との関係について、同定手法を用いて検討する。

2. 解析方法

地盤物性の揺らぎが地盤の伝達関数へ及ぼす影響を把握するための数値実験には、二次元有限要素法(汎用プログラム; Super-FLUSH)を用いる。図-1に示すような2層地盤を考え、50m×50mの表層部を有限要素領域とし、側方境界・底面境界とも粘性境界、自由地盤は均質地盤とする。

実際の地盤における土質係数の統計的性質については、 G/G_{max} のばらつきは高々2割程度であり⁹⁾、土の力学定数や物理定数は正規分布で近似でき、土質や定数により異なるものの、変動係数は0.1~0.4、自己相関距離は0.6~1.4

mと報告されている¹⁰⁾。要素の大きさは、自己相関距離との対応を考え、1m×1mとする。各要素の剛性は変動係数0.2の正規分布をなすものと仮定し、正規乱数により与える。入力波は、振幅0.5のパルス波とし、鉛直下方から入力する。

Q値は、入射波と地表面中央における応答波とのフーリエスペクトル比に、地盤構造の同定手法を適用することにより求める。同定手法は、水平成層地盤に鉛直下方からSH波が入射すると仮定して一次元重複反射理論から得られる伝達関数¹¹⁾とフーリエスペクトル比の残差平方和が最小となるように、各層のS波速度 V_s とQ値を求めるものである。その際、各層の密度と層厚は既知として取り扱う。同定手法として、汎

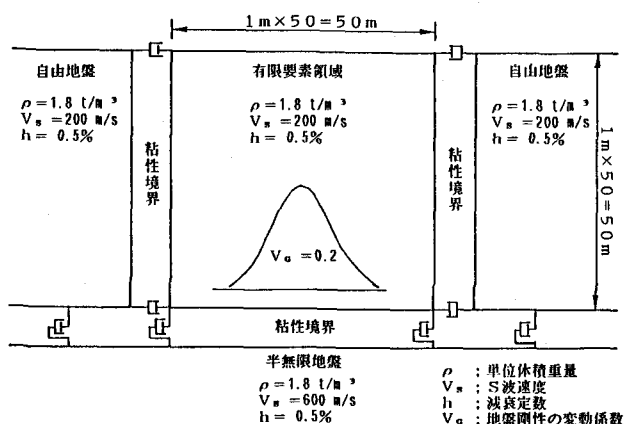


図-1 解析モデル

田・辻原ら¹²⁾の方法を用いる。また、 $Q = Q_0 f^\alpha$ (f ; 周波数)として Q_0 と α を同定することにより、 Q 値の周波数依存性について検討する。

3. 一次元解析と二次元解析の比較

図-1の地盤モデルについて、正規乱数により10回の試行を行う。一次元の場合は層厚1mの50層モデルとして、各層の剛性を正規乱数により与える。二次元解析により得られた地表面における最大加速度振幅の分布を図-2に示す。地盤の不均質性により空間的に応答がばらつくことがわかる。

不均質地盤における一次元重複反射理論による伝達関数と二次元有限要素法によるスペクトル比を図-3に示す。一次元では不均質地盤の応答倍率のばらつきが大きい。二次元では低次のピークでは均質地盤とはほとんど差はないが、5次のピークでは1割程度不均質地盤の方が大きくなっている。各ピークでの応答倍率の平均値と標準偏差を表-1に示す。二次元の方が、ばらつきが小さく、また高次になるほどばらつきが大きくなる様子が明瞭である。1次のピークでの波長は、約200mで要素の大きさの200倍、5次のピークでの波長は22mで22倍となる。したがって、波長が、地盤剛性が均質と考えられる部分の大きさの20~50倍程度

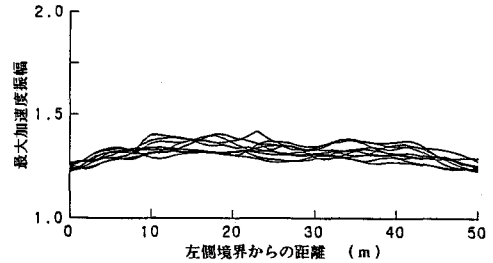
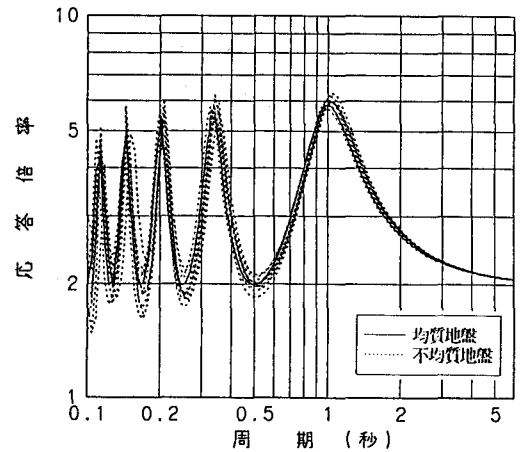
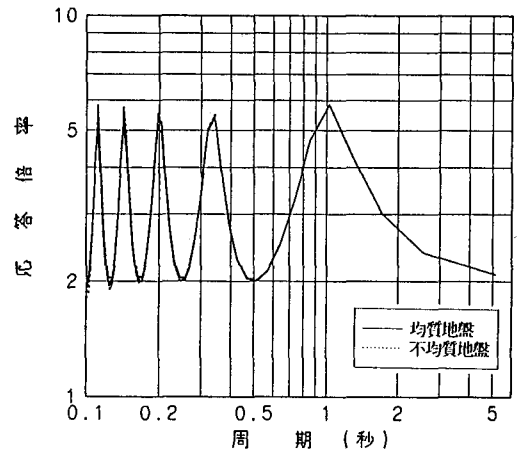


図-2 地表面最大加速度分布



(a) 一次元重複反射理論



(b) 二次元有限要素法

図-3 均質地盤と不均質地盤(変動係数0.2)のスペクトル比の比較

表-1 応答倍率の平均値と標準偏差

	平均値		標準偏差	
	一次元	二次元	一次元	二次元
1次	5.99	5.84	0.150	0.004
2次	5.71	5.46	0.327	0.024
3次	5.40	5.42	0.445	0.087
4次	4.91	5.56	0.540	0.148
5次	4.56	5.48	0.369	0.238

表-2 同定により得られた地盤定数の平均値と標準偏差

	平均値		標準偏差	
	一次元	二次元	一次元	二次元
V_s	194.8	199.6	0.02	0.001
Q_0	47.0	86.2	0.44	0.14
α	0.22	0.59	1.14	0.47

に小さくなると、不均質性の影響が現れてくると考えられる。

図-3の伝達関数を用いて、同定により求めた V_s 、 Q_0 、 α の平均値と変動係数を表-2に示す。 α の値は、観測記録に基づいて報告されている値と同程度の値となっている。 V_s の変動係数は小さく、 α の変動係数は大きいことから、地盤の剛性分布により Q 値の周波数依存性の度合は異なると考えられる。一次元重複反射理論と二次元有限要素法による値を比較すると一次元の方が変動係数が大きく、 Q 値の周波数依存性が小さいことがわかる。以上より、低ひずみに対応する内部減衰が小さい際に、地盤の不均質性が伝達関数へ及ぼす影響について検討するためには、水平方向に均質と仮定することになる一次元解析は適切ではないと考えられる。

4. Q 値の周波数依存性と地盤物性の揺らぎや内部減衰との関係

地盤剛性の変動係数 V_0 を0.1, 0.2, 0.3とした場合の応答波形を入射波と共に図-4に示す(各ケースとも試行回数は1回)。変動係数が大きくなるほど後方散乱により励起される(図中の矢印参照)波が、大きくなっていることがわかる。図-5にスペクトル比を示す。変動係数を0.3とした場合には、著しく剛性が高い部分や低い部分が生じており、そのためにスペクトル比の高次のピークの応答倍率が大きくなっている。同定結果を表-3に示す。変動係数が大きい場合も、 V_s は与えた正規分布の平均値に収束している。地盤剛性の変動係数が大きくなるほど、 Q 値の周波数依存性が大きくなることがわかる。

地盤の内部減衰定数 h を0.5, 2.0 %とした場合のスペクトル比を図-6に示す。各ケースにおける同定結果を表-4に示す。減衰定数が小さいほど応答倍率は大きくなり、 Q 値の周波数依存性が大きくなることがわかる。このことより、観測記録の加速度

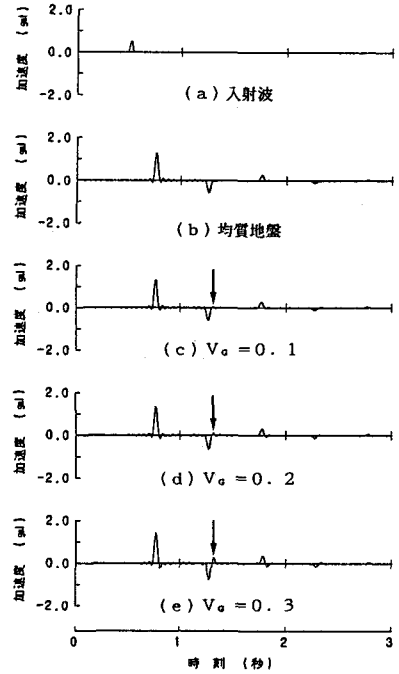


図-4 地盤剛性の変動係数 V_0 による応答波形の違い

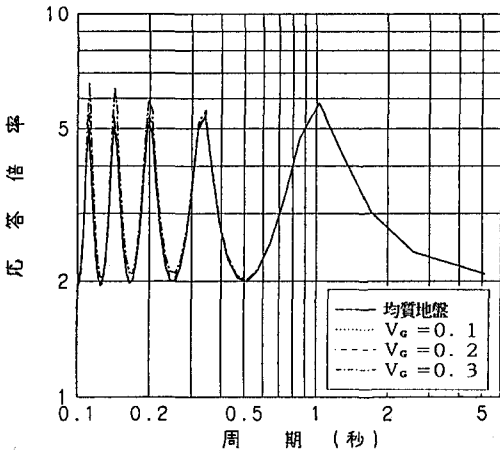


図-5 地盤剛性の変動係数 V_0 によるスペクトル比の違い

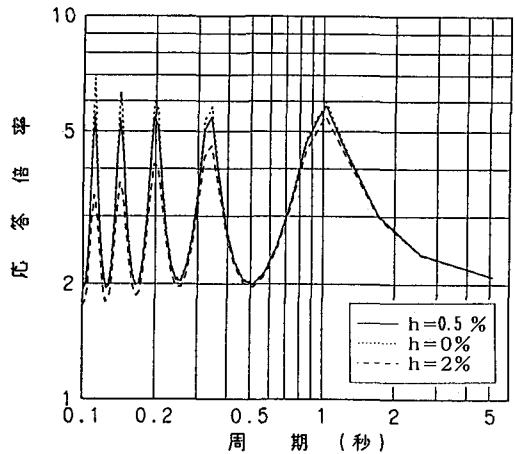


図-6 減衰定数 h によるスペクトル比の違い

表-3 地盤剛性の変動係数 V_s による Q 値の違い

	V_s	Q_0	α
$V_s = 0.1$	199.9	100.0	0.08
$V_s = 0.2$	199.5	74.2	0.54
$V_s = 0.3$	199.2	124.0	3.26

表-4 減衰定数 h による Q 値の違い

	V_s	Q_0	α
$h = 0\%$	199.6	431.9	2.40
$h = 0.5\%$	199.5	74.2	0.54
$h = 2\%$	199.9	25.0	0.05

レベルが小さい場合には、せん断ひずみは小さく内部減衰も小さいので Q 値は周波数依存性を示し、加速度レベルが大きい場合には、せん断ひずみが大きくなるにつれ減衰定数が大きくなるので、 Q 値の周波数依存性は見られなくなるものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、まず二次元有限要素法や一次元重複反射理論を用いた数値実験により、地盤物性の揺らぎが地盤の伝達関数へ及ぼす影響について検討を行った。また、 Q 値の周波数依存性と地盤の不均質性や内部減衰との関係について検討した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 地盤物性の揺らぎを二次元で考慮することにより、高次のピークでの応答倍率が均質地盤に比べて大きくなり、観測記録に見られる Q 値の周波数依存性を表すことができる。一次元では水平方向に均質と仮定することになるため、 Q 値の周波数依存性が明瞭ではない。
- 2) 地盤剛性の変動係数が大きく、減衰定数が小さいほど、 Q 値の周波数依存性は大きくなる。すなわち、加速度レベルが小さい場合には、せん断ひずみは小さく内部減衰も小さいので Q 値は周波数依存性を示し、強震状態においては、せん断ひずみが大きくなるにつれ減衰定数が大きくなり、 Q 値の周波数依存性は見られなくなる。

最後に、同定の際に用いたプログラムは徳島大学沢田助教授・和歌山高専辻原講師より頂いたものを Q 値の扱いのみ変えたものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 原昭夫；地盤の動力学的性質とその応用，第2回地盤震動シンポジウム，pp.33～39，1973年
- 2) 小林喜久二・阿部康彦・天池文男；地盤の Q 値の振動数依存性とモデル化について，『表層地質が地震動に及ぼす影響』シンポジウム，pp.49～54，1989年
- 3) 北澤巧次・萩尾堅治；表層地盤の減衰特性の観測と実験，第15回地盤震動シンポジウム，pp.57～62，1987年
- 4) 木下繁夫，表層地盤における減衰特性に関する考察，土木学会論文報告集，第330号，pp.15～25，1983年
- 5) 末富岩雄・中村晋；強震時における表層地盤の Q 値について，第8回日本地震工学シンポジウム，pp.589～594，1990年
- 6) 香川敬生・澤田純男・岩崎好規；深部地盤構造が地表面地震動に及ぼす影響，第8回日本地震工学シンポジウム，pp.391～396，1990年
- 7) 小松元彦・和泉正哲・杉村義広・栗田哲；1次元不均質地盤のSingle Scattering 場の理論的解析，日本建築学会大会梗概集，pp.219～220，1990年
- 8) 佐藤俊明・川瀬博；不均質な表層地盤を伝播する弾性波動の散乱と減衰特性に関する研究，日本建築学会大会梗概集，pp.217～218，1990年
- 9) 東畑郁生・S. Ronteix；地盤の地震応答解析への重複反射法の適用性，第35回土質工学シンポジウム，pp.1～8，1990年
- 10) 松尾稔；地盤工学—信頼性設計の理念と実際—，技報堂出版，1984年
- 11) 土岐憲三；構造物の耐震解析，技報堂出版，1981年
- 12) 辻原治・沢田勉・谷高博；鉛直アレー観測記録による成層地盤構造の同定，土木学会第43回年次学術講演会，pp.998～999，1988年