

周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察

杉戸真太*・合田尚義**・増田民夫***

地盤の地震応答解析において、これまで実務の面でも多用されてきた等価線形化手法は、地盤が軟弱で地震動のレベルが大きい場合にはとくに高周波数領域で観測値と大きくずれることが指摘されてきた。本研究では、ひずみ波形のスペクトル強度に応じた等価ひずみを各周波数毎に規定する方法を提案し、地盤構造がきわめて詳細に調査されているアレー観測点での強震記録に基づいてその妥当性とパラメータの最適値について検討したものである。

Key Words : *equi-linearized technique, multi-refraction theory, response analysis of ground, shear modulus and damping of soil*

1. 序 論

地盤の地震応答解析において、土の剛性、減衰特性とひずみとの非線形な関係を等価な線形関係に置き変えるいわゆる等価線形化手法は、周波数領域の解析ができるため簡便であり、また地表で得られた強震記録からその地盤構造を用いて基礎での入力地震動を推定するいわゆる逆解析も可能であることから、とくに実務の面でも多用されてきた。このような等価線形化手法を用いた解析プログラムとして1972年に発表されたプログラムSHAKE¹⁾は、地震工学の分野において多大の貢献をしてきているが、地盤がとくに軟弱で地震動のレベルが大きい場合には計算結果が観測値と大きく異なることが以前から指摘されてきた²⁾⁻⁵⁾。

一般に、軟弱層での地盤ひずみは大きく、このため、数値解析では等価剛性が低く等価減衰が大きくなることによる高い周波数成分の異常な減衰として結果に現われてくる。すなわち、数 Hz 程度以上の周波数領域において地震動の増幅が異常に小さく評価されてしまうことである。最大ひずみから等価ひずみを求めるための係数 (SHAKE では 0.65) に関しては、著者ら⁶⁾も、これを地震動の継続時間の関数とするなど、かつて修正法を検討したが、とくに軟弱な地盤にはうまく適用できるモデルとはならなかった。土のせん断剛性、減衰定数のひずみ依存性に関してはこれまで数多くの室内実験が行われてきており、Hardin, Drnevich⁷⁾による拘束圧を考慮したモデル等いわゆる $G-\gamma$, $h-\gamma$ 曲線が多数提案されてきている⁸⁾。しかしながら、上記の等価線形化手法における高周波数領域での計算値と観測値との違いは、とくに

に地盤が軟弱で地震動のレベルが大きい場合には用いる $G-\gamma$, $h-\gamma$ 曲線には依存しないほど大きいものである。このことは、一定の等価剛性、等価減衰を、地盤のひずみに大きくは寄与しない高周波数領域でも同様に与えることに無理があるものと考えられる。つまり実現象においては、周波数毎の地盤震動のレベルの違いによりそのひずみ振幅も大きく異なり、結果として周波数に依存した剛性、減衰の効果があることを示唆しているものと考えられる。

以上のことから、本報では、地盤の応答解析によく用いられている等価線形化手法における上記の問題点を解決するような等価剛性、等価減衰定数の設定法についての一提案を行う。それは個々の周波数成分の振幅レベルに応じた評価法であり、この手法を定式化するパラメータの値について考察する。そして、提案した手法の妥当性、等価ひずみを規定するパラメータの値について鉛直アレー記録を用いて検討し、また従来の等価線形化手法との相違点を比較検討する。検討に用いる強震記録は、比較的軟弱な東京電力(株)新大田変電所建設予定地で観測された千葉県東方沖地震 (M=6.7) および南関東東方沖地震 (M=7.0) による鉛直アレー記録である。同観測地点では、軟弱地盤における地震動増幅特性の詳細な検討⁹⁾を目的としたサスペンション型の PS 検層¹⁰⁾等による詳細な地盤再調査が行われており¹¹⁾、地盤の動的物性が通常の地盤調査に比べてはるかに詳細に明らかにされつつある場所である。

2. 周波数特性を考慮した等価線形化手法による地盤の応答解析法

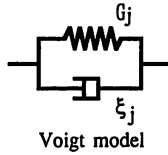
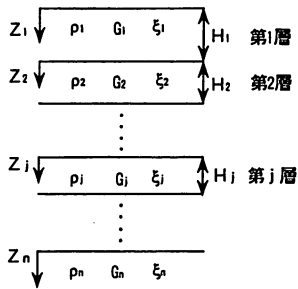
(1) 等価ひずみの定義

水平多層構造地盤を SH 波が鉛直方向に多重反射する一次元問題での検討で一般性を失わないと考えられることから、以下では SHAKE¹⁾ のような一次元多層の連続

* 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科
(〒501-11 岐阜市柳戸 1-1)

** 兼松株式会社建設開発第 2 部

*** 東京電力株式会社建設部 課長



図一 多層地盤モデル

体問題を扱う。一般に、土を連続体として波動方程式を立てる場合、Voigt型のモデルがよく用いられる。土の密度を ρ 、せん断バネ剛性を G 、粘性係数を ξ 、とすると図一に示す多層地盤での波動方程式は次のように表される¹²⁾。

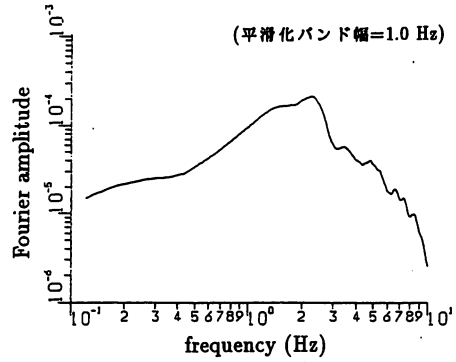
$$\rho_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2} = G_j \frac{\partial^2 u_j}{\partial z_j^2} + \xi_j \frac{\partial^3 u_j}{\partial t \partial z_j^2} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、添字 j は層番号、減衰定数 h_j と ξ_j との関係は、 $\xi_j = 2G_j h_j / \omega$ と表される。 ω は角振動数である。

土のせん断剛性、減衰定数とひずみとの関係は、通常小さなひずみレベルでの初期せん断剛性 G_0 と G との比 G/G_0 、および減衰定数 h をそれぞれせん断ひずみ γ の関数として多くの実験結果に基づいてモデル化されている。SHAKEのような通常の等価線形化手法では、最大ひずみの65%を等価平均ひずみ γ_0 として、これより定まるせん断剛性 G 、減衰定数 h を周波数領域の計算において周波数に依存することなく一律に適用している。応答解析では、与えられた等価ひずみとそれに基づいて計算される最大ひずみの65%の値とを比較し、所定の誤差内に収まった時点で繰り返し計算を終了する。

一般に、地震動の各周波数成分の振幅レベルは大きく異なるため、ひずみ波形に寄与する度合いは周波数により大きく異なるものと考えられる。図二は、次章で検討しているアレー観測点での地盤における応答解析から算出される第3層(層厚1.4m, $V_s = 92$ m/sec)の中央におけるせん断ひずみ波形のフーリエスペクトルの例である。ただし、同図は $\Delta f = 1.0$ Hz のバンド幅でスムージングしたものである。この例でもわかるように、最大値を与える2 Hzあたりの中周波数領域と8~10 Hzあたりの高周波数領域でのスペクトル値は1オーダー以上異なっている。このように、ひずみ波形のスペクトル特性が周波数に大きく依存することから、各周波数毎にそれぞれのひずみ波形に寄与する度合いに応じて適切なせん断剛性と減衰定数を与えれば従来の等価線形化手法のもつ問題点を解決できるであろうという発想の下に、次式に示す周波数依存型の等価平均ひずみ $\gamma_f(\omega)$ を考えた。

$$\gamma_f(\omega) = C \gamma_{\max} \frac{F_f(\omega)}{F_{\max}} \dots \dots \dots (2)$$



図二 ひずみ波形のフーリエスペクトルの例(新大田観測点の第3層, 千葉県東方沖地震)

ただし、 C は係数、 γ_{\max} は最大せん断ひずみ、 $F_f(\omega)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、 F_{\max} は $F_f(\omega)$ の最大値である。つまり、各周波数毎の剛性、減衰を与える等価平均ひずみを、ひずみ波形のスペクトル振幅の大小に応じた値とすることである。式(2)における係数 C は、周波数軸上での等価ひずみ全体のレベルを調整するものであり、 $F_f(\omega)/F_{\max} \equiv 1.0$ 、 $C = 0.65$ とするとSHAKEと同じになる。係数 C の値は、SHAKEとの対応を考えれば、0.65から1.0程度の範囲とすればよいと考えられる。

式(2)における無次元量 $F_f(\omega)/F_{\max}$ は、最大値1.0周波数軸上でのひずみ振幅の相対的な違いを表している。ひずみ振幅の周波数特性を考慮した等価ひずみの表現法は式(2)以外にも無数にあり得るが、式の形が簡単でしかも物理的な意味が明確であることから、式(2)を検討することとした。

一般に、ひずみ波形のフーリエスペクトルは高周波数領域においてレベルが小さくなるが、扱う波形データの時間間隔とデータサンプル数に依存して周波数軸上で大きく増減する。周波数軸上でのこのような大きな増減をそのまま各周波数の等価平均ひずみに反映させるよりは、むしろ周波数軸上の大まかなレベルの違いを取り入れることが重要であると考えられる。従って、式(2)の $F_f(\omega)$ は一定のバンド巾を有する三角形ウィンドウにより平滑化したものを用いることとした。以後の検討ではこのバンド幅を1 Hzとしている。

等価平均ひずみを周波数に関わらず最大ひずみの65%とするSHAKEにおける等価ひずみ γ_0 と比較して、この周波数依存型の等価平均ひずみ $\gamma_f(\omega)$ を用いる手法(Frequency Dependent Equi-Linearized Technique: 略してFDELと呼ぶ)は、次に述べるような相違点、類似点があると考えられる。

(a) SHAKEで比較的良好に計算結果が実測値と一致していた中周波数領域では、一般にひずみ波形のフーリエ振幅は相対的に大きな値となる。したがって、等価せ

せん断剛性 $\gamma_f(\omega)$ は γ_e と大きく変わらないため SHAKE と同様の結果が得られる。

(b) 軟弱な地盤において増幅率を過小評価する傾向のあった高周波数領域では、 $\gamma_f(\omega)$ は γ_e よりもかなり小さな値となるため、SHAKE と比較して等価せん断剛性は高く、等価減衰定数は小さな値となる。従って、FDEL では SHAKE よりも増幅率を大きく評価することになり計算結果が改善される。

(c) 低周波数領域では、一般に $\gamma_f(\omega)$ は γ_e よりも小さな値となる。ただし、低周波数領域の波の波長が長いことから、せん断剛性や減衰定数が変化してもその増幅特性に大きな影響がない。したがって、低周波数領域では SHAKE と FDEL との違いはほとんど無い。

以上のように FDEL では、通常の等価線形化手法で良好な結果が得られている低・中周波数領域の特性はそのままに保持する。一方、とくに軟弱な地盤において増幅率を極端に過小評価する傾向のあった高周波数領域の問題点を改善し、周波数全域で良好な結果が得られるようになると考えられる。なお、等価線形化手法では土の非線形な応力-ひずみ関係を表すモデルが必要であるが、ここでは土の拘束圧の影響を考慮した次式に示す Hardin-Drnevich モデル⁷⁾を用いた。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}, \quad \frac{h}{h_{max}} = \frac{\gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

なお、 G_0 は初期せん断剛性、 h_{max} は最大減衰定数、 γ_r は規準化ひずみ⁷⁾ ($\gamma_r = \tau_{max}/G_0$) である。以下、FDEL と SHAKE で同じ $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h/h_{max} \sim \gamma$ 曲線を適用して比較する。ただし、このモデルをそのまま微小ひずみ領域まで延用すると減衰定数が極端に小さくなるため、減衰定数に下限値 h_{min} を設定する必要がある。微小ひずみ領域における減衰定数については、実験での測定精度が高くなく未だ不明な点が多いが、ここではこれまでの多くの実験結果から、 $h_{min} = 2 \sim 3\%$ 程度として検討を進める。また、最大減衰定数 h_{max} は 20% とした。図-3 に、本手法のフローチャートを示した。図中の (a)、(b)、(c) の太い線で囲まれた箇所が通常の等価線形化手法と異なる部分である。すなわち、等価ひずみをひずみ波形のフーリエスペクトルに対応させて定義すること (同図 (a)、(c))、および以下に示すように周波数領域を分割して収束判定を行うこと (同図 (b)) である。

(2) 収束の判定

式 (2) により与えられる等価ひずみから $G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h/h_{max} \sim \gamma$ 曲線により等価剛性、等価減衰定数を求め、それにより地盤の応答解析を行う。その結果得られた地盤各層中央でのひずみ波形のフーリエスペクトルより得られる等価ひずみと、応答計算に用いられた 1 つ前の段

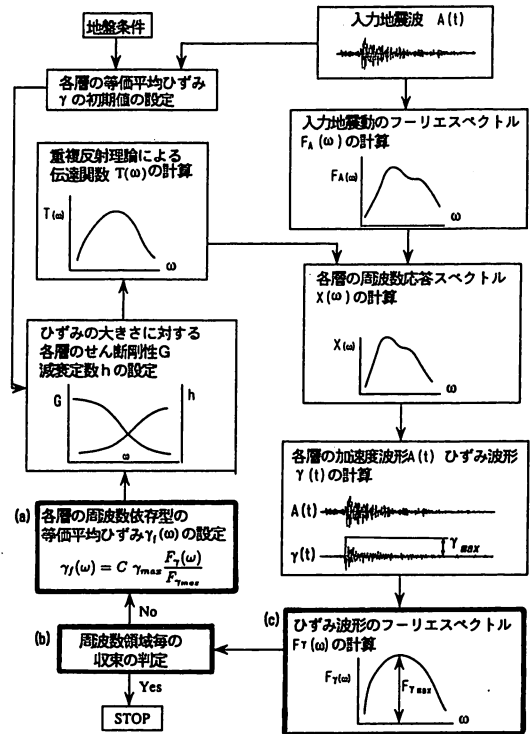


図-3 地盤応答解析の計算手順 (FDEL モデル)

階の等価ひずみとの比の対数を取り、この値の大小で誤差を評価する。したがって、これらは地盤の各層、各周波数ごとに得られる。そして、このようにして得られた各層における周波数軸上での誤差の平均が一定値以内に収まった時に収束とみなす。ただし、この場合周波数軸上での平均をとるサンプル数が多いために、各周波数毎でみれば誤差が収束していなくても、全周波数の誤差の平均が小さくなり収束したとみなしてしまう場合が考えられる。そこで、スペクトル領域を 1.0 Hz 以下の低周波数領域、1.0~5.0 Hz の中周波数領域、5.0 Hz 以上の高周波数領域に三分割し、3 つの周波数領域でそれぞれ所定誤差内に収まったときに収束とみなすようにした。このような収束判定におけるスペクトル領域の分割は、以下に示すそれぞれの周波数領域の地盤震動特性の違いを考慮するためである。

- (a) 波長が長く、ひずみレベルも小さく非線形性の影響はほとんどないと考えられる低周波数領域。
- (b) ひずみレベルが大きく非線形性の影響が大きく、地盤の卓越周波数を決定する中周波数領域。
- (c) ひずみレベルは大きくないが、波長が短いことから非線形性の影響 (特に減衰の影響) が大きい高周波数領域。

このような 3 つの周波数領域での誤差の平均値の判定値を 3% とし、以下の解析を行う。なお、このような

誤差判定における周波数領域の分割を行っても、周波数軸上における等価平均ひずみ $\gamma_f(\omega)$ の連続性は保持されている。また、このような条件での以下における解析では、その繰り返し計算回数は4~10回程度であり、通常の等価線形化手法による繰り返し計算回数とほぼ同じであった。

3. アレー観測記録に基づく解析法の妥当性の検討

(1) アレー観測記録と地盤構成

本研究で提案する手法の妥当性、パラメータの値の検討には、比較的地盤が軟弱かかた地盤構成が詳しく調査されているアレー観測点において得られた地震動レベルの大きい記録が望ましい。このような目的に用い得るデータとして、東京電力(株)新大田変電所建設地点で行われたアレー観測記録がある。同地点は、東京湾岸の比較的地盤が軟弱な地盤であり、G.L. -1.5, -22.3, -38.5, -80.0 mの4深度において1971年から1990年まで地震観測が行われていた⁹⁾。数多くの強震記録のうち最も加速度レベルの大きな1987年千葉県東方沖地震(M=6.7)および加速度レベルの比較的小さい1982年関東東方沖地震(M=7.0)の記録を用いる。同地点では、これまでにG.L. -80 mまでのPS検層を含む一般的な地盤調査が行われているが、地震動増幅特性の研究を目的とした詳細な地盤調査がG.L. -42 mまでの範囲で行われつつある。その1つは0.2 mピッチでのサスペンション型のPS検層である。これは、孔中固定型受信機を用いた板たたき法等によるPS検層よりも精度よく簡便に行える検層システムである。この地盤再調査孔は、地震計の設置孔からわずかに離れた場所であるが、付近一帯の数多くのボーリング調査の結果によれば地下数m以下はほぼ一様な成層構造と判断されるため、以下の解析に用いることとした。

図-4に、同地点でのG.L. -42 mまでの地盤調査の結果を示した。図中左の大きい◎印は、地震計設置位置を示している。また、図の右のせん断波速度は、実線が従来のPS検層によるもの、小さい●印を結んだものがサスペンション型のPS検層によるそれぞれの測定結果である。この図より、サスペンション型の検層によるS波速度は従来のPS検層で決められる層分割の中において変動しており、とくにG.L. -14~16 m, -30 mあたりで大きく異なっていることがわかる。同図左に示される地質分類毎にサスペンション型により得られたせん断波速度の平均値を求め、それを各層のせん断波速度としてモデル化された地盤構造を表-1に示した。ただし、土の密度は以前より調査されている大まかな地質区分毎の値を参考にして今回の詳細な地質区分に割り当てたものである。なお、応答解析における地盤各層の初期せん

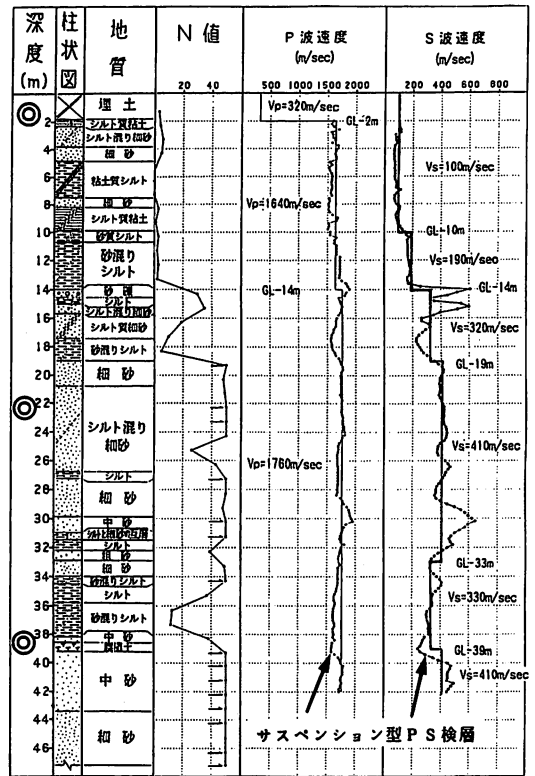


図-4 新大田鉛直アレー観測点における地盤構造 (東京電力新大田変電所建設予定地、◎印は地震計設置位置)

表-1 新大田アレー観測点の地盤構造モデル

層番号	層厚 (m)	層上面深さ (m)	$\rho(g/cm^3)$	$V_s(m/sec)$
1	1.80	0.00	1.85	100.00
2	0.60	1.80	1.85	105.33
3	1.40	2.40	1.85	92.14
4	1.10	3.80	1.85	68.89
5	2.70	4.90	1.50	79.76
6	0.70	7.60	1.50	89.58
7	1.65	8.30	1.50	99.14
8	0.85	9.95	1.80	160.87
9	3.20	10.80	1.80	178.02
10	0.55	14.00	1.60	525.03
11	0.45	14.55	1.60	408.41
12	0.70	15.00	1.60	503.89
13	1.75	15.70	1.60	281.74
14	1.60	17.45	1.60	278.46
15	1.75	19.05	1.60	399.32
16	4.00	20.80	1.80	418.33
17	0.90	24.80	1.80	380.30
18	1.10	25.70	1.80	441.61
19	0.40	26.80	1.80	442.28
20	2.70	27.20	1.80	438.11
21	1.10	29.90	1.80	580.27
22	0.50	31.00	1.80	469.99
23	0.70	31.50	1.80	455.84
24	0.70	32.20	1.80	361.44
25	1.10	32.90	1.72	340.63
26	0.50	34.00	1.72	402.57
27	1.30	34.50	1.72	362.38
28	2.40	35.80	1.72	314.12
29	0.40	38.20	1.72	272.66
30	0.60	38.60	1.72	251.00
31	2.80	39.20	1.85	434.86

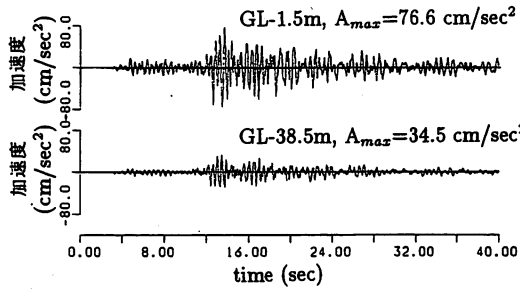


図-5 新大田アレー観測点での地震動記録 (千葉県東方沖地震, comp. = N 095 E)

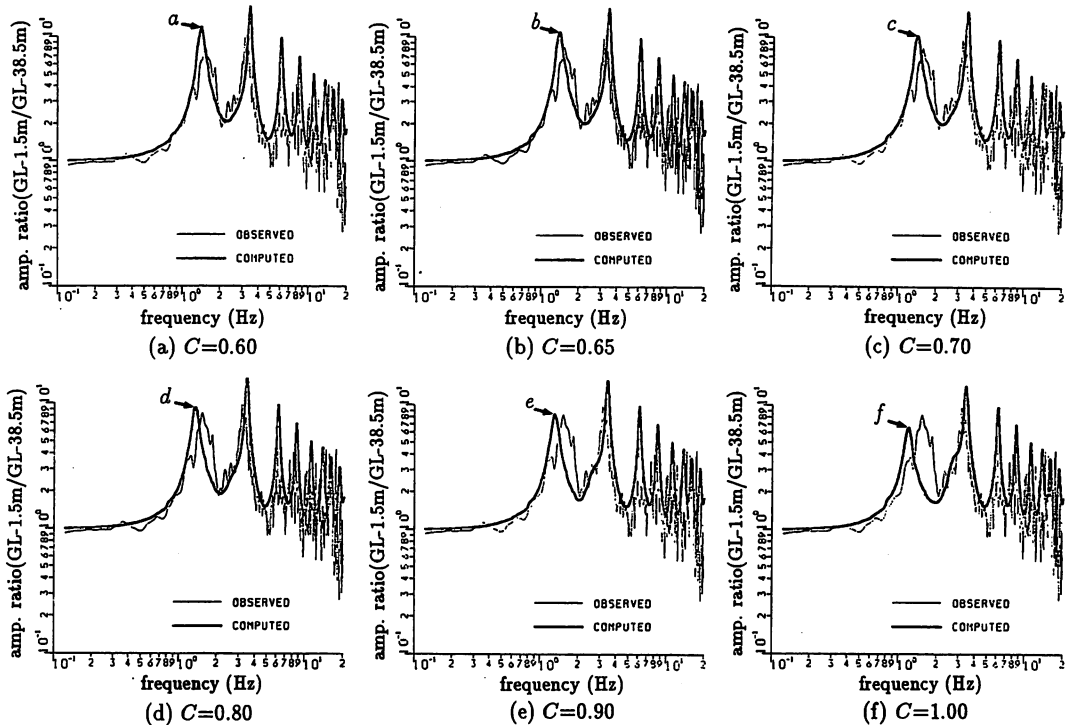


図-6 本手法 (FDEL) による推定値と観測記録による増幅特性の比較 (新大田観測点, 千葉県東方沖地震, comp. = N 095 E)

断剛性 G_0 は、表-1における V_s より直接求めたものを用いる。以下、本手法におけるパラメータの値の検討には、この新大田での G.L. -1.5 m と G.L. -38.5 m での地震動記録を用いる。

(2) パラメータの検討

表-1に示す新大田での詳細な地盤構造を用いて、同地点における千葉県東方沖地震 ($M=6.7$) による地表層 (G.L. -1.5 m) での加速度波形 (comp. = N 095 E) から地中 (G.L. -38.5 m) での加速度波形を本手法により計算し、そのフーリエスペクトルから得られる増幅率を観測記録による増幅率と比較して検討する。図-5に、検討に用いる地震動波形を示した。最大加速度は、G.L. -1.5 m で 76.6 cm/sec^2 、G.L. -38.5 m で 34.5

cm/sec^2 である。

図-6は、本手法において減衰定数の下限値を $h_{\min}=0.02$ とし、式 (2) における係数 C の値を順に (a) $C=0.60$ 、(b) $C=0.65$ 、(c) $C=0.70$ 、(d) $C=0.80$ 、(e) $C=0.90$ 、(f) $C=1.00$ とした場合のフーリエスペクトルの増幅率を示したものである。同図は、強震計の有効周波数領域を考慮して $0.1\sim 20.0 \text{ Hz}$ について示しており、図中の太い実線が本手法から得られる計算値、細い実線が観測値によるスペクトルの増幅率を表している。したがって、(a)~(f) の各図における細い実線はすべて同じである。本手法による増幅率の係数 C による変化を見るため、1次モードのピークの付近に順に a~f の記号を付けた。これらの結果から明らかよう

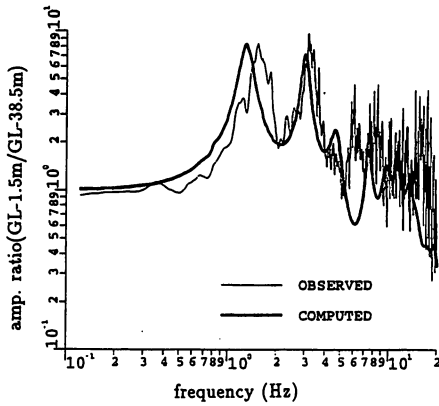


図-7 通常の等価線形化手法による推定値と観測記録による増幅特性の比較
(新大田観測点, 千葉県東方沖地震, comp. = N 095 E)

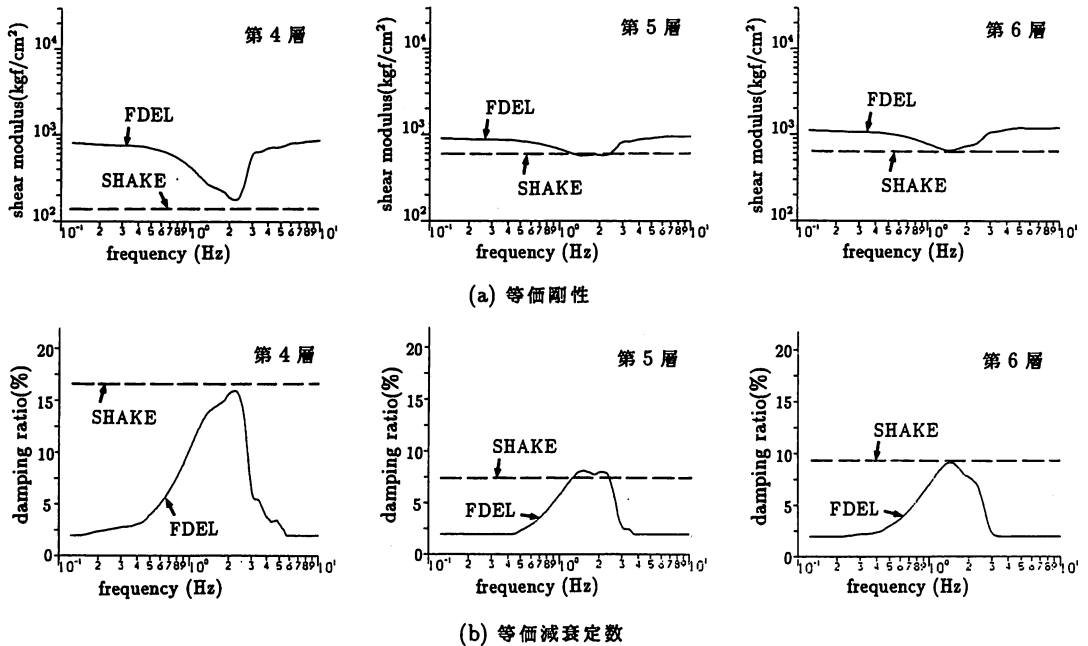


図-8 地盤各層における等価剛性, 等価減衰定数
(表-1の新大田観測点の層番号に対応, (千葉県東方沖地震, comp. = N 095 E))

に, 式 (2) の係数 C の増加によりひずみ振幅に大きく寄与する 1 Hz 前後の 1 次モードの周波数が低周波数側へ移り, また, その増幅率が低下する。1 次モードの合い方のみに着目すれば, この場合, (a) $C=0.65$ または $C=0.70$ が観測値ともっともよく対応している。一方, 3 Hz 以上の 2 次, 3 次の高次モードの周波数, 増幅率とも係数 C の値によらずほとんど変化していない。これは, ひずみ波形のスペクトル強度がこの周波数領域では小さく, 係数 C の値による等価剛性, 等価減衰定数の変化がほとんどないことによる。また, 地盤構造がたいへん詳細に得られていることから, さらに高次の

モードまでいずれの場合についても観測値とよく対応していることがわかる。

次に, 図-7 は, 通常の等価線形化手法 (SHAKE) において本手法と同様の $G/G_0 \sim \gamma$, $h/h_{max} \sim \gamma$ 曲線を用いた場合の結果を示したものである。1, 2 次モードは観測値と比較的によく対応しているが, 5 Hz 以上の高周波数領域において従来から指摘されてきたような増幅率の過小評価の傾向がはっきりわかる。すなわち, 太い実線で表された計算値による増幅率が観測値のそれを大きく下回っている。表-2 に, 図-6 (a)~(f) および図-7 の場合の最大加速度および加速度全パワーの値と

表-2 地震動増幅率の比較 (新大田観測点, 千葉県東方沖地震)
(G.L. -1.5 m での最大加速度=76.6 cm/sec², 加速度全パワー=10.2×10³cm²/sec³)

		観測値 (GL-38.5m)	FDEL ($h_{min}=0.02$)						SHAKE
			C=0.60	C=0.65	C=0.70	C=0.80	C=0.90	C=1.00	
最大	値 (cm/sec ²)	34.5	30.5	31.2	31.6	32.9	33.8	34.8	38.7
加速度	増幅率	2.22	2.51	2.45	2.42	2.33	2.27	2.20	1.98
加速度	値 (10 ³ cm ² /sec ³)	1.58	1.60	1.71	1.75	1.83	1.94	2.10	2.34
パワー	増幅率	6.45	6.38	5.96	5.83	5.57	5.26	4.86	4.36

表-3 地震動増幅率の比較 (新大田観測点, 千葉県東方沖地震)
(G.L. -1.5 m での最大加速度=76.6 cm/sec², 加速度全パワー=10.2×10³cm²/sec³)

		観測値 (GL-38.5m)	FDEL ($h_{min}=0.03$)						SHAKE
			C=0.60	C=0.65	C=0.70	C=0.80	C=0.90	C=1.00	
最大	値 (cm/sec ²)	34.5	31.1	31.8	32.5	34.2	34.5	36.6	38.7
加速度	増幅率	2.22	2.46	2.40	2.36	2.24	2.22	2.09	1.98
加速度	値 (10 ³ cm ² /sec ³)	1.58	1.68	1.72	1.78	1.91	1.98	2.24	2.34
パワー	増幅率	6.45	6.07	5.93	5.73	5.34	5.15	4.55	4.36

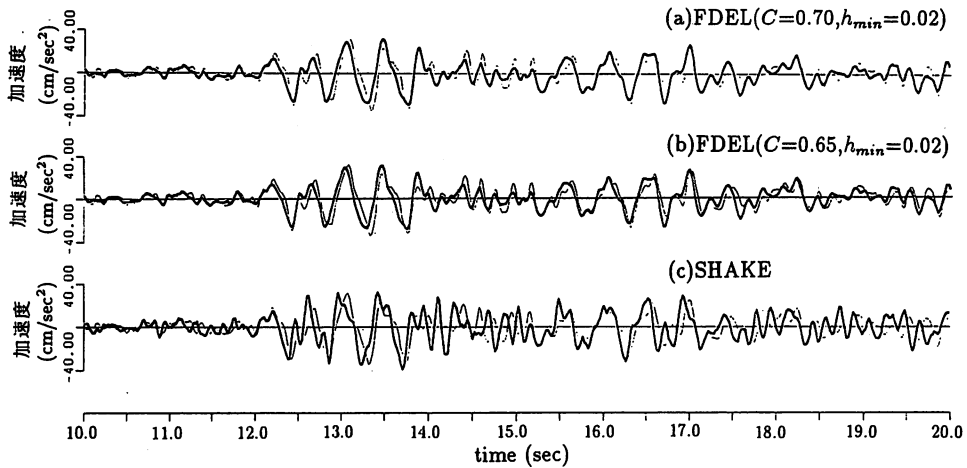
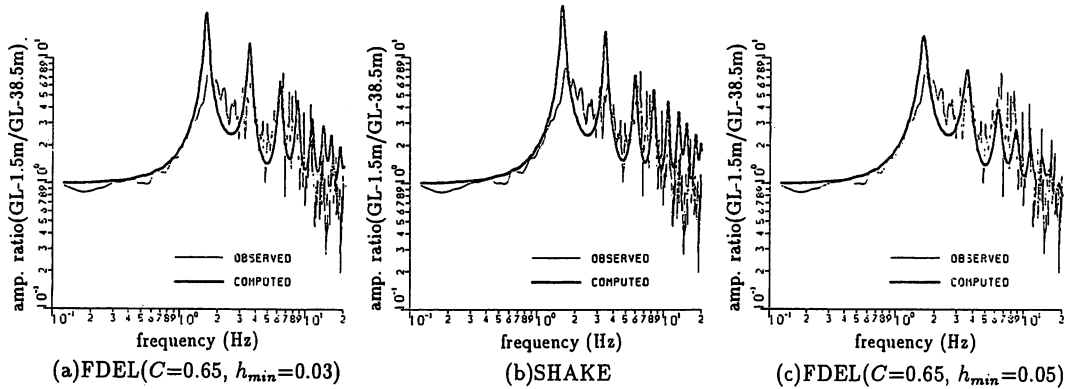


図-9 地中 (G.L. -38.5 m) での推定値と観測記録の比較
(新大田観測点, 千葉県東方沖地震, 太い実線が計算値, 細い実線が観測記録)

その増幅率を、観測値による値とともに示した。比較的高周波数領域のスペクトル強度の目安となる最大加速度の増幅率では、 $C=0.9$ の場合が最も観測値に近い。周波数軸上全体の平均的な増幅率を表す加速度パワーの場合は、係数 C が大きくなるにしたがい増幅率は小さくなってしまいが、SHAKEによる値よりはどの場合も観測値に近い。最大加速度および加速度パワーのいずれも観測値からの誤差が10%程度以内であるのは、 $C=0.65, 0.70$ の場合である。表-1の各層のなかで最も軟弱な第4層から6層について、 $C=0.65, h_{min}=0.02$ の場合の等価剛性および等価減衰定数を図-8に示した。同図には、周波数に依存しないSHAKEの場合の等価剛性、等価減衰定数も示した。本手法(FDEL)と従来の等価線形化手法(SHAKE)におけるこれらの値の周波数軸上での具体的な違いを見ることができる。すなわち、低周波数領域および高周波数領域において両者が大きく異なり、このうち高周波数領域での違いが図-6、

7および表-2での両者の違いに現れている。

表-3には、減衰定数の下限値を $h_{min}=0.03$ とした場合の結果を示した。減衰定数の下限値を上げたことにより最大加速度、加速度パワーの増幅率が表-2と比較してわずかに小さくなるのがわかる。図-9に、本手法でのパラメータを $C=0.65$ および $0.70, h_{min}=0.02$ とした場合と通常の等価線形化手法(SHAKE)によって得られるG.L. -38.5 mでの加速度波形の推定値を、同地点の観測記録とともに比較して示した。同図は、図-5において10秒から20秒までの強震部を拡大したものである。図中の太い実線が計算値、細い実線が観測記録を表している。したがって、(a)~(c)において細い実線は全て同じものである。両手法とも13秒から14秒付近の強震部は観測波形と比較的によく一致しているが、図-9(c)のSHAKEでは15秒および20秒付近で4~5 Hz程度のやや高い周波数成分の位相がずれている。この周波数成分は、図-7の結果からもわかるよう



図—10 本手法 (FDEL) および SHAKE による推定値と観測記録における増幅特性の比較 (新大田観測点, 南関東東方沖地震, comp. = N 095 E)

表—4 地震動増幅率の比較 (新大田観測点, 南関東東方沖地震)
(G. L. -1.5 m での最大加速度=21.2 cm/sec², 加速度全パワー=1.03×10³cm²/sec³)

		観測値 (GL-38.5m)	FDEL (C=0.65)				SHAKE
			$h_{min}=0.02$	$h_{min}=0.03$	$h_{min}=0.04$	$h_{min}=0.05$	
最大 加速度	値 (cm/sec ²)	7.58	9.388	9.390	9.395	9.401	9.283
	増幅率	2.80	2.258	2.258	2.257	2.255	2.284
加速度 パワー	値 (10 ³ cm ² /sec ³)	0.195	0.201	0.202	0.204	0.207	0.199
	増幅率	5.28	5.12	5.10	5.05	4.98	5.18

に、増幅率が観測値と大きくずれている部分である。一方、図—9 (a), (b) の本手法の場合は、位相のずれがほとんどないことがわかる。

つぎに、同地点で得られた地震動レベルの小さい記録の場合について両手法を比較する。図—10 は、南関東東方沖地震 (M=7.0, Δ=208 km) における同地点での記録を用いて、本手法 (FDEL) と SHAKE との比較を示したものである。図—10 (a) は、本手法において $C=0.65$, $h_{min}=0.03$ とした場合、(b) は SHAKE による結果を示したものである。地震動レベルが地表層 (G. L. -1.5 m) で 21.2 gal, 地中 (G. L. -38.5 m) で 7.6 gal と小さく、ほぼ線形領域での解析となるため、両手法の違いはほとんどなく、3 次モード程度までいずれも卓越周波数は観測値とよく対応していることがわかる。ただし、両ケースとも 1, 2 次モードの周波数での増幅率は観測値よりかなり高い。参考までに、このピークの高さに大きく影響する減衰定数の下限値を $h_{min}=0.05$ とすると図—10 (c) のように下がり観測値に近づく。ただし、7~8 Hz 以上の高次の部分で観測値より小さくなってしまふ。式 (2) における係数を $C=0.65$ として、この減衰の下限値の増幅率への影響を表—4 に示した。増幅率で見ると、加速度全パワーは FDEL, SHAKE とともに観測値に近いが、最大加速度は増幅率をともに過小評価している。また、 h_{min} による違いはこの例ではほとんどない。また、本手法と SHAKE との違いはほとんどないと言える。このように、軟弱な地盤でも地震動のレベルが低い場合には、通常の

等価線形化手法でも十分有効であることを示しており、従来の知見と一致するものである。

4. 結 論

周波数特性を考慮した等価線形化手法に関して一提案をし、詳細な地盤調査が行われているアレー観測点での強震記録を用いてその妥当性を検討した。軟弱地盤においては、通常使われてきた等価線形化手法に比べて提案した手法が有効であることを示した。本研究で得られた成果を要約すると以下ようになる。

(1) 等価線形化手法において土のせん断剛性、減衰定数を規定する等価ひずみを、ひずみ波形のフーリエ振幅の大小に応じて規定する方法を提案した。これは、一般にひずみ波形のスペクトル振幅が周波数軸上で周波数に依存して大きく異なることから、地盤各層においてひずみ波形に寄与する割合に応じた等価ひずみを周波数毎に与えるという発想に基づくものである。

(2) 詳細な地盤調査が行われている新大田鉛直アレー観測点での強震記録を用いて提案した手法の妥当性とパラメータの検討を行った。その結果、式 (2) の係数 C はひずみ波形のスペクトル振幅が卓越する中周波数領域の増幅特性に大きく影響し、 C の値として $C=0.65\sim 0.70$ 程度が適当と判断された。また、減衰定数の下限値 h_{min} は、スペクトル振幅のレベルの低い高周波数領域の増幅特性に影響し、本研究で用いたアレー記録による検討では h_{min} は 0.02 程度となった。

(3) SHAKE に代表される従来の等価線形化手法と

比較し、地震動レベルが大きい場合とくに軟弱な地盤では、数 Hz 程度以上の高周波数領域において本手法 FDEL の有用性が確認された。すなわち、従来の手法でみられた高周波数領域での増幅率の過小評価がなく、全周波数領域において観測記録とよく一致することが示された。一方、地震動レベルが小さい場合には、従来の手法および本手法ともに観測値に十分に近い値を得ることができることも確認された。

以上、強震動、軟弱地盤という条件での通常の等価線形化手法の“高周波数領域での増幅率の過小評価”を解決する簡便な手法を提案し、その妥当性、有用性を示した。ここでは、詳細な地盤構造が調査されているアレー観測点での強震記録を用いて検討したが、式(2)の係数 C は土質条件や、地盤震動の継続時間にもある程度依存するものと考えられる。近年、わが国の多数のアレー観測記録がデータベース化されつつあり、様々な土質条件、地震動強度のレベルに対してこのようなパラメータの検討を行い、より一般性の高い手法としていきたいと考えている。また、高周波数領域の増幅率を支配する減衰定数の下限値 k_{\min} も土質条件等に依存するものと考えられる。微小ひずみレベルでの減衰定数の計測は、実験精度の限界もありむずかしい問題であるが、近年の高精度の動的せん断試験のデータの蓄積により、これらが明らかにされることが期待される。また、とくに軟弱な堆積層が基盤と表層との間にある場合には、地震動レベルが大きい場合に繰り返し計算における軟弱層でのひずみの非収束(ひずみの流れ)が生ずることにより中周波数領域で極端に観測値からずれることがある。このあたりは、等価線形化手法の限界でもある。

最後に、式(2)により等価ひずみを各周波数ごとに与えるということは、周波数毎に等価剛性、等価減衰が異なるので波が分散性を有することになる。大きなひずみレベルで軟らかい媒質を伝播するランダム波の分散性については、これまでにほとんど議論されたことはないが、大変興味あるテーマである。比較的大きなせん断ひずみを一定にかけた状態で、微小なひずみ振幅での高周波数の繰り返しせん断試験を行うと、そのせん断剛性、減衰ともに大きなひずみをかけない場合の微小ひずみレベルでの値に近いことが実験によって確かめられている⁷⁾。したがって、振幅レベルの異なるランダム波の分散性は有り得ることと考えられる。等価線形化手法はある意味では簡便法であり、本研究では観測値をうまく再現できる手法を提案することに主眼を置き、このような式(2)が意味する物理的な現象に立ち入ることはしなかった。今後、高精度の動的なせん断試験法の開発、高精度・高密度のアレー観測による質の高いデータが公開

されることによって、このような問題が検討されることが期待される。

謝辞：本研究で用いた新大田アレー観測点での強震記録と地盤資料は、(財)地震予知総合研究振興会に設置された「電力流通設備耐震対策研究会」(委員長：片山恒雄)の第1WGで検討中のものである。研究の一部は、文部省科学研究費総合研究A(代表者：東畑郁生)およびNKK基盤技術研究所より援助を受けた。本研究は、先の第1WGおよび土質工学会「軟弱地盤における地震動増幅と被害に関する研究委員会」(委員長：伯野元彦)での検討課題の一つとして行われたものでもある。関係機関、各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) P.B. Schnabel, J. Lysmer and H.B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.
- 2) 田蔵 隆・清水勝美・横田治彦：地盤の非線形地震応答特性，第15回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.63-78, 1987.8.
- 3) 山崎文雄：軟弱地盤はよく揺れるか揺れないか？，一実測とSHAKEとの矛盾を考える一，土木学会全国大会講演集，pp.1102-1103, 1990.9.
- 4) 東畑郁生・Ronteix, S.：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，数値解析による土構造物と基礎の挙動予測一，土質工学会，pp.1-8, 1990.
- 5) 吉田 望：地盤の土質力学的特性と地震動予測，一研究の現状と実用上の問題点一，第20回記念地盤震動シンポジウム講演集，日本建築学会，pp.27-32, 1992.12.
- 6) 後藤尚男・杉戸真太・亀田弘行・斎藤宏・大滝健：工学的基盤における地震動予測モデル，京都大学防災研究所年報，No.27-B2, pp.19-48, 1984.4.
- 7) B. O. Hardin and V. P. Dmehich : Shear Modulus and Damping in Soils : Design Equations and Curves, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.98, SM 7 pp.667-692, 1972.7.
- 8) F. Tatsuoka and S. Shibuya : Deformation Characteristics of Soils and Rocks from Field and Laboratory Tests, Report of the Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Vol.37, No.1, pp.1-136, 1992.3.
- 9) Fujii, N., Annaka, T., Ohki, H., Fujitani, M. and Yasuda, N. : A Study on the Characteristics of Seismic Vertical Motion, Proc. of 10 WCEE, Vol.2, July pp.577-582, 1992.
- 10) 小倉 雄：サスペンション型のS波検層システムの開発，応用地質調査年報 No.1, pp.143-159, 1979.
- 11) 小田真也・安田 進・増田民夫・木辻浩二：動的変形係数の深度分布に関する試験，土木学会第48回年次学術講演会，Ⅲ-202, pp.458-459, 1993.9.
- 12) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，1976.8.

(1993.5.10 受付)

FREQUENCY DEPENDENT EQUI-LINEARIZED TECHNIQUE FOR SEISMIC RESPONSE ANALYSIS OF MULTI-LAYERED GROUND

Masata SUGITO, Hisayoshi GODA and Tamio MASUDA

A method is presented for equi-linearized seismic response analysis of multi-layered ground including frequency dependent effect of shear modulus and damping on ground motion amplification. The frequency dependent equivalent strain in proportion to the Fourier amplitude of shear strain time history is defined for evaluation of shear modulus and damping factor depending on the frequency contents. The method is examined in the strong motion array records and minutely surveyed soil profile at array observation station located at very soft ground. Superiority of the presented method to the conventional equi-linearized method is demonstrated especially in case of strong ground motion level and soft ground condition.
