

(88) 周波数特性を考慮した等価線形化手法による地震応答解析

京都大学工学部 杉戸真太、(株)兼松 合田尚義
東京電力(株)工務部 増田民夫、悦永賢司

1. はじめに

地盤の地震応答解析におけ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逆解析も可能であることから、とくに実務の面で多用されてきた。1972年に発表されたプログラムSHAKE^[1]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。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。著者ら^[2]も、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)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。このことは、高周波数領域で周波数に依存しない一定の等価剛性、等価減衰を与えることに無理があるものと考えられる。実現象においては、周波数毎の地盤震動のエネルギーが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ことができる。

以上のことから、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った。提案した手法の妥当性を鉛直アレー記録を用いて検討し、また従来の手法(SHAKE)との相違点を検討した。検討に用いた記録は、東京電力(株)新太田変電所建設予定地における鉛直アレー記録であり、当該地点は地震動増幅特性の詳細な検討を目的としたサスペンション型のPS検層^[3]等による詳細な地盤再調査が行われ、地盤の動的物性が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ひずみの定義と収束判定

等価ひずみの定義 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_e 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。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。そこで、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、SHAKEのもつ問題点を解決できるであろうという発想の下に、式(1)に示す周波数依存型の等価平均ひずみ $\gamma_f(\omega)$ を考えた。

$$\gamma_f(\omega) = C \gamma_{max} \frac{F_\gamma(\omega)}{F_{\gamma_{max}}} \quad (1)$$

ただし、 C は係数、 γ_{max} は最大せん断ひずみ、 $F_\gamma(\omega)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、 $F_{\gamma_{max}}$ は $F_\gamma(\omega)$ 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、各層の中央におけるひずみ波形のフーリエスペクトルの大小に応じた値とすることである。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、 $F_\gamma(\omega)/F_{\gamma_{max}} \equiv 1.0$ 、 $C = 0.65$ 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、0.65～1.0の範囲とすればよいと考えられる。また、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よって大きく増減する。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、むしろ周波数軸上での大き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(1)の $F_\gamma(\omega)$ 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巾を1Hz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_e 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(FDELと呼ぶ)は、次に述べるような相違点、類似点がある。

・SHAKEで計算結果が実測値と比較的よく一致していた1~数Hz程度のいわゆる中周波数領域では一般に地盤震動のエネルギーが卓越する。この領域では γ_f は γ_e と大きく変わらないためFDELでもSHAKEと同等の結果となる。

・SHAKEで増幅率を過小評価する傾向のあった数Hz程度のいわゆる高周波数領域では、 $\gamma_f(\omega)$ は γ_e よりもかなり小さな値となるため、SHAKEと比較してせん断剛性は高く、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。

・中周波数領域と同様SHAKEで計算結果が実測値と比較的よく一致する1Hz程度以下の低周波数領域では、 $\gamma_f(\omega)$ は γ_e よりも小さな値となる。しかし、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ためやはりよく一致する。

このように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し、一方、増幅率を過小評価する傾向のあった高周波数領域の計算結果を改善し、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Hardin-Drnevichモデル^[4]を、本手法および通常の等価線形化手法との比較に用いた。また、減衰の最大値 h_{max} は0.20とした。ただし、減衰の定義式に従って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} を設定した。微小ひずみ領域における多くの実験結果から、 h_{min} は2~3%が適当であると考えられる。図-1に、本手法のフローチャートを示した。図中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。

収束の判定

式(1)により与えられる等価ひずみから等価剛性、等価減衰定数を求め、それにより地盤応答解析を行う。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計算に用いられた1つ前の段階の等価ひずみとの誤差を各周波数ごとに計算し、そ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。この場合平均をとるデータ数が多いために、周波数によっては誤差が大きく収束してい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ため、フーリエスペクトルを1.0Hz以下の低周波数領域、1.0~5.0Hzの中周波数領域、5.0Hz以上の高周波数領域に三分割し全て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。収束判定における周波数領域のこのような三分割の理由は、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。

1. 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。
2. ひずみレベルが大きく非線形性の影響がやや大きく、地盤の卓越振動数を決定する中周波数領域。
3. 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%として、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。

3. アレー観測記録による解析法の検討

表-1に示す新太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(GL-1.5m)での加速度波形(N095E)から基盤(GL-38.5m)での加速度波形を計算し、そのフーリエスペクトルから得られる増幅率を図-2に示した。図-2(a)~(e)は、本手法(FDEL)において減衰定数の下限値を $h_{min}=0.02$ とし、式(1)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) $C=0.90$ 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。一方、図-2(f)はSHAKEによる結果である。図-2(a)~(e)の本手法による結果をみると、 C の値の増加にともなって1次モードの高さが下がり且つその卓越周波数が低下していることがわかる。1次モードのみの観測値との一致度で言えば、この場合 $C=0.60$ または $C=0.65$ 程度が良いことがわかる。一方、高周波数領域では、ひずみスペクトルのレベルが低いため係数 C の影響は現れず、どの場合も3次もしくは4次モードまで観測値と良く対応していることがわかる。次に、通常の等価線形化手法である(f)のSHAKEの場合をみると、1次、2次モードまでは観測値

と比較的一致しているもののさらに高次のところで、これまでよく指摘されてきたように、観測値を大きく下回っている。表-2に、図-2(a)~(e) および (f) の場合の最大加速度および加速度全パワーの値とその増幅率を、観測値による値とともに示した。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増幅率を見ると、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ますが、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-3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-2 および表-2での両者の違いに現れている。

4. まとめ

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な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。その結果、本手法(FDEL)により、軟弱な地盤での高周波数領域での増幅も観測値をよく再現できることがわかった。式(1)の係数 C や減衰定数の下限値 h_{min} の値は、土質条件によってある程度異なる性質のものであろうが、一応の目安として $C = 0.65$ 程度、 $h_{min} = 0.02 \sim 0.03$ 程度と考えている。現在、他の多くのアレー記録により、式(1)の係数および減衰定数の下限値についてさらに検討を進めている。

謝辞 本報で用いた新太田での記録と地盤資料は、(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な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。

表-1 新太田変電所(東京電力)での地盤構造

層番号	層厚 (m)	$\rho(\text{g/cm}^3)$	$V_s(\text{m/sec})$
1	1.80	1.85	100.00
2	0.60	1.85	105.33
3	1.40	1.85	92.14
4	1.10	1.85	68.89
5	2.70	1.50	79.76
6	0.70	1.50	89.58
7	1.65	1.50	99.14
8	0.85	1.80	160.87
9	3.20	1.80	178.02
10	0.55	1.60	525.03
11	0.15	1.60	408.41
12	0.70	1.60	503.89
13	1.75	1.60	281.74
14	1.60	1.60	278.46
15	1.75	1.60	399.32
16	4.00	1.80	418.33
17	0.90	1.80	380.30
18	1.10	1.80	411.61
19	0.40	1.80	442.28
20	2.70	1.80	438.11
21	1.10	1.80	580.27
22	0.50	1.80	469.99
23	0.70	1.80	455.84
24	0.70	1.80	361.44
25	1.10	1.72	340.63
26	0.50	1.72	402.57
27	1.30	1.72	362.38
28	2.40	1.72	314.12
29	0.40	1.72	272.66
30	0.60	1.72	251.00
31	2.80	1.85	434.86

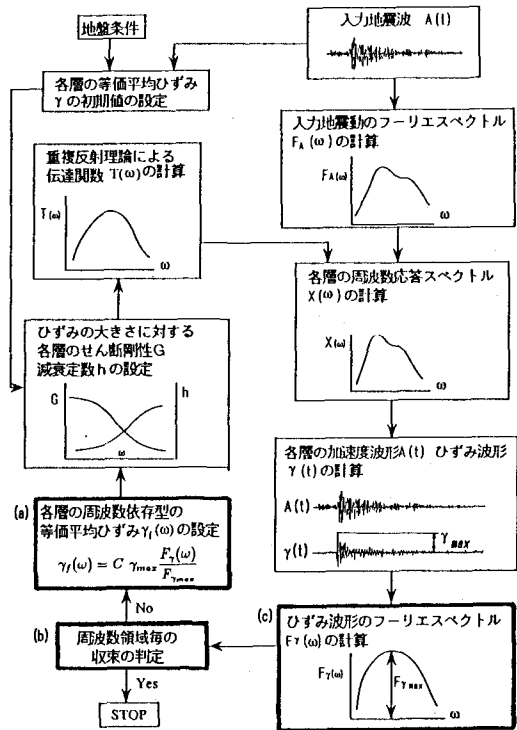


図-1 解析のフローチャート

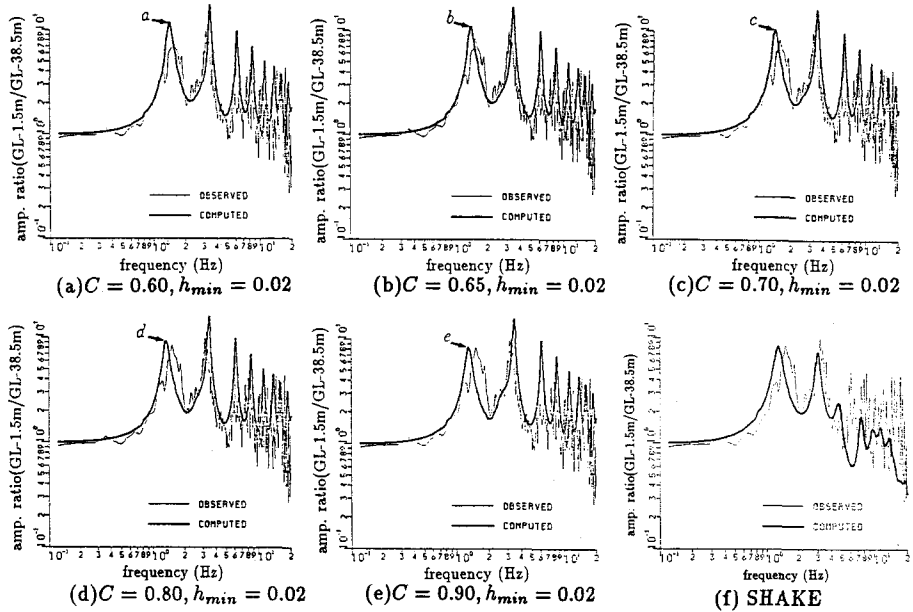


図-2 地震動増幅率の比較 (新太田変電所アレー観測点、千葉県東方沖地震 (M=6.7))

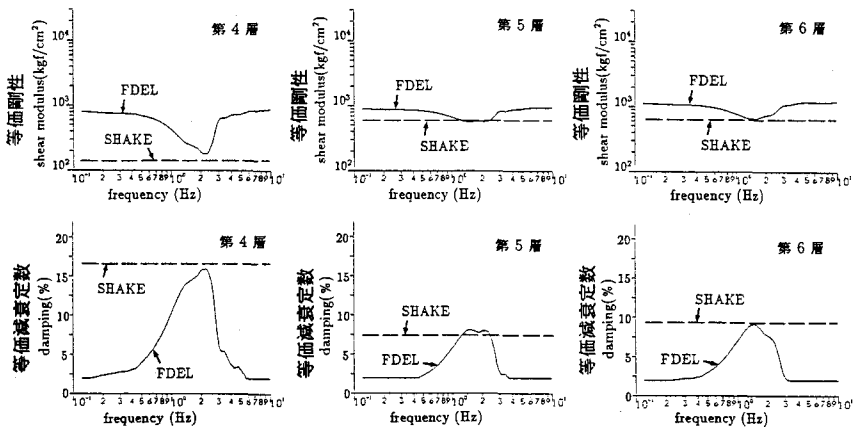


図-3 地盤各層における等価剛性、等価減衰定数 (表-1の地盤層番号に対応)

表-2 地震動増幅率の比較 (新太田観測点、千葉県東方沖地震)

(GL-1.5mでの最大加速度=76.6 cm/sec²、加速度全パワー=10.2×10³ cm²/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 加速度	値 (cm/sec ²)	34.5	30.5	31.2	31.6	32.9	33.8	34.8	38.7
	増幅率	2.22	2.51	2.45	2.42	2.33	2.27	2.20	1.98
加速度 パワー	値 (10 ³ cm ² /sec ³)	1.58	1.60	1.71	1.75	1.83	1.94	2.10	2.34
	増幅率	6.45	6.38	5.96	5.83	5.57	5.26	4.86	4.36

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", ERRC, 72-12, 1972.
- [2] 後藤、杉戸、亀田、斉藤、大滝: 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, 1984.4.
- [3] 小倉公雄: 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.
- [4] Hardin, Drnevich: "Shear Modulus and Damping in Soils", ASCE, Vol.98, SM6, SM7, 1972.