

周波数依存型地盤応答解析における パラメータの最適化のための一検討

末富 岩雄¹・吉田 望²

¹株式会社エイト日本技術開発 東京支社 防災保全部 耐震・保全グループ
(〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@ej-hds.co.jp

²東北学院大学 工学部 環境建設工学科
(〒985-8537 宮城県多賀城市中央1-13-1)

E-mail: yoshidan@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

実務で広く使われている地盤の等価線形解析の課題については、20年以上前から取り組まれてきているところである。しかしながら、実際上必要となる地表観測記録から基盤地震動を算定する条件（逆応答）まで含めると、未だに十分な知見が得られているとは言い難い。本論文では、当初のSHAKEの欠点を解消するためにこれまでに提案されている各種の周波数依存型解析法により順応答と逆応答の双方で比較し、さらに周波数依存性を規定するパラメータの最適化についても、複数の強震アレー観測記録を用いて検討した。

Key Words : *equivalent-linear analysis, array observation record, strong ground motion, frequency-dependent characteristic of soil behavior*

1. はじめに

地盤の地震応答解析では、質点系モデルによる時刻歴応答解析と、一次元重複反射理論による周波数応答解析が用いられる。前者の方が強い地震動における地盤の非線形挙動を詳細に表すのに適している一方で、後者は任意位置での入力における任意位置での応答を算出できる利点がある。また、周波数領域での解析であるので、散乱減衰など周波数依存でモデル化されている現象を取り込みやすい利点もある。そのようなことから、後者の等価線形解析手法であるSHAKE¹⁾（本論文では、手法名として記す）は、今でもしばしば用いられている。

SHAKEについては、最大加速度を過小評価する（文献2）、高振動数成分の増幅を過小評価する（文献3）などの課題が指摘されている。後者のために、地表から工学的基盤に引き戻す逆応答解析では、非現実的な最大加速度が得られることがしばしば生じる。これでは等価線形解析を利用できないため、地盤のせん断剛性や減衰定数を周波数に依存する特性で扱う方法がこれまでに提案されている。杉戸ら³⁾の方法（以下、FDEL）はひずみのフーリエスペクトルと関連づけており、吉田ら⁴⁾の方法（以下、DYNEQ）は、ゼロクロス法により求めたひずみ波形の振幅と周波数の関係に基づいている。

本論文では、FDEL、DYNEQとも当初のモデルでは、高振動数域ではほぼ線形の値を使うために増幅を過大評価する傾向にあることを示した上で、その改良法を含め、鉛直アレー観測記録の地震応答解析を、順応答と逆応答の双方で行いつつ、かつ手法による差異が大きい記録を用いて、DYNEQでの周波数依存性を改良するためのパラメータの最適化について検討する。

2. 周波数依存型解析法の概要

2.1 SHAKEによる方法

一次元重複反射理論に基づく等価線形解析はSchnabelら¹⁾によりプログラムSHAKEが発表されて以来、広く地盤の地震応答解析に用いられてきた。

地盤はせん断ひずみの値に応じて、剛性や減衰の大きさが変化する非線形性を有する。波動方程式の解析解を用いる重複反射理論は、入射波と反射波の分離、任意位置で入力地震動が設定できるなどの利点は大きい。非線形性を表現するためには等価線形化法を使わざるを得ないという短所もある。

等価線形化法では、解析の全時間を通じ材料特性

は変わらないが、非線形の効果を式(1)による有効ひずみ γ_{eff} で剛性と減衰を評価することにより考慮する。

$$\gamma_{eff} = \alpha \gamma_{max} \quad (1)$$

ここで、 γ_{max} は最大ひずみ、 α は等価線形化のための係数である。 α の値は0.65が一般に用いられる。

2.2 FDELによる方法

杉戸ら³⁾は、式(1)により有効ひずみを決めると、特に周波数の高いところで剛性を小さく減衰を大きく評価するので、増幅を小さめに評価しすぎるとして、ひずみ波形のフーリエスペクトルに着目して、 α を周波数の関数として表す方法を提案している。その後、Suetomi & Yoshida⁵⁾で、強震記録での適合性をよくするために、式(2)のようにパラメータを加えて調整しているのので、本論文ではその形式を用いる。

$$\gamma_{eff} = C \cdot \left(\frac{F_{\gamma}(f)}{F_{\gamma_{max}}} \right)^p \cdot \gamma_{max} \quad (2)$$

ここで、 $F_{\gamma}(f)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、 $F_{\gamma_{max}}$ はその最大値である。この場合、剛性、減衰とも周波数の関数となる。ここで、 $F_{\gamma}(f)$ は一般にかなりばらつきの大きい関数形状をしているので、三角形ウィンドウによる平滑化を行っている。 $C=0.65$ 、 $p=1.0$ で杉戸らが提案するFDELに一致する。

Suetomi & Yoshida⁵⁾では、1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドと関西電力(株)総合技術研究所(以下、関電技研)における記録を基盤入力と地表入力で解析し、 $p=0.5$ 、 $C=0.8$ を適切としている。

2.3 吉田による方法(DYNEQ)

FDELと同様に、有効ひずみを周波数の関数として設定する方法であるが、式(3)の関数形を提案している⁴⁾。

$$\gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} \quad (3)$$

ここで、 f_e と m は既往の記録を説明できるように設定したパラメータであり、 f_e より高い周波数域では弾性挙動を示すものとする。 f_p は、ひずみが最大振幅 γ_{max} となる時の周波数である。東大生研千葉アレー、新富士変電所、ポートアイランドの3つの強震

記録のシミュレーションに基づき、 $f_e=15\text{Hz}$ 、 $m=2$ と一意的に定めている。なお、 f_p より小さい周波数では有効ひずみは γ_{max} 、 f_e より大きい周波数では有効ひずみは0とする。

f_e は、ひずみの時刻歴からゼロクロス法で最大振幅(=最大ひずみ γ_{max})を生じた半サイクルの時刻に対応し(図-1)、その後の見直しにより、DYNEQのマニュアル⁶⁾では、6Hzを標準としている。本論文では、この値を用いる。なお、山本・笹谷⁷⁾では、2003年十勝沖地震でのKiknet豊頃の記録から $m=2.7$ が適切としているが、調整パラメータが増えすぎるので、本論文では $m=2.0$ で固定する。

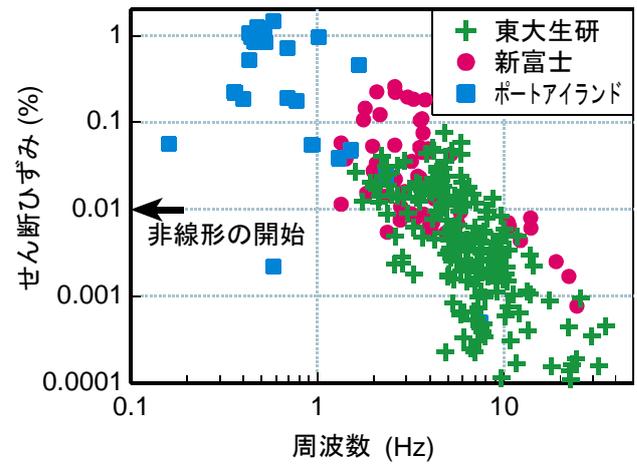


図-1 ゼロクロス法によるひずみ振幅と周波数の関係⁴⁾

なお、プログラムDYNEQ⁶⁾は、SHAKE、FDEL、DYNEQ及び本論文で検討する改良パラメータを利用する機能も有しているのので、本論文の計算は全てプログラムDYNEQで行う。

3. 鉛直アレー記録の解析によるパラメータ検討

3.1 検討対象とする鉛直アレー

強震動の鉛直アレー観測記録として、表-1に示す8波を対象とする。なおポートアイランドでは激しく液状化していることもあり、逆応答計算が困難であるのので、最後に順応答で適用性を確認するものとして、パラメータ検討には用いない。

地震応答解析の精度を比較する上では、初期モデルが妥当であることが不可欠である。ポートアイランド、関電技研については、吉田⁸⁾、Suetomi & Yoshida⁵⁾の値を用いる。他の港湾観測点については、ボーリング情報¹⁰⁾に基づいて初期モデルを設定した上で、弱震記録のスペクトル比に適合するように、地盤モデルを修正した。層厚等は変更せず、S波速度のみの調整とした。本来なら散乱減衰を考慮した減衰の周波数依存性まで検討した方が精度は高まるが、実務でそこまで考慮していないので、今回は検

表-1 検討対象とする鉛直アレー観測記録

観測点	観測地震	地中地震計 設置深度(m)	卓越周期：線形 (秒)
ポートアイランド ⁹⁾	1995年兵庫県南部地震	83.4	1.20
関西電力(株)総合技術研究所 ⁵⁾	1995年兵庫県南部地震	97.0	1.30
仙台港 ¹⁰⁾	2011年東北地方太平洋沖地震	8.7	0.12
釧路港 ¹⁰⁾	1993年釧路沖地震	77.45	0.95
	1994年北海道東方沖地震		
	2003年十勝沖地震		
八戸港 ¹⁰⁾	2008年岩手県沿岸部の地震	18.2	0.30
小名浜港 ¹⁰⁾	2011年東北地方太平洋沖地震	11.05	0.18

表-2(a) ポートアイランドの地盤モデル⁸⁾

No.	土質	層厚(深度) (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)
1	盛土(砂礫)	3.0(0.)	1.70	150
2	盛土(砂礫)	3.0(3.0)	2.00	173
3	盛土(砂礫)	4.0(6.0)	2.00	195
4	盛土(砂礫)	4.2(10.0)	2.00	214
5	盛土(砂礫)	3.5(14.2)	2.00	224
6	沖積粘性土 (Ma13)	8.6(17.7)	1.70	180
7	洪積砂礫層	3.8(26.3)	2.00	230
8	洪積砂礫層	2.0(30.1)	1.80	170
9	洪積砂礫層	4.8(32.1)	2.00	230
10	洪積砂礫層	22.8(36.9)	2.00	330
11	洪積粘性土 (Ma12)	22.6(59.7)	1.80	280
12	洪積砂礫層	1.1(82.3)	2.00	450
13	洪積砂礫層	(83.4)	2.00	450

表-2(b) 関西電力総合技術研究所の地盤モデル⁵⁾

No.	土質	層厚(深度) (m)	密度(t/m ³)	V _s (m/s)
1	砂礫	1.40(0.)	2.00	110
2	粘土	1.20(1.40)	2.00	130
3	砂	1.75(2.60)	1.95	140
4	砂	2.20(4.35)	2.00	130
5	砂礫	1.55(6.55)	2.05	180
6	粘土	2.50(8.10)	1.80	140
7	砂礫	5.30(10.60)	2.10	270
8	粘土	2.90(15.90)	1.65	190
9	粘土	4.30(18.80)	2.00	270
10	砂礫	3.80(23.10)	2.00	480
11	粘土	1.80(26.90)	1.75	220
12	砂	4.35(28.70)	2.20	400
13	粘土	7.90(33.05)	1.80	260
14	砂礫	4.45(40.95)	2.15	510
15	粘土	1.15(45.40)	1.70	300
16	砂	4.75(46.55)	2.05	380
17	粘土	10.70(51.30)	1.50	260
18	粘土	5.60(62.00)	1.85	380
19	粘土	3.35(67.60)	1.95	360
20	粘土	3.85(70.95)	1.70	340
21	粘土	8.20(74.80)	1.70	270
22	粘土	9.60(83.00)	1.55	340
23	粘土	2.90(92.60)	1.95	390
24	砂	(95.50)	2.00	430

討していない。表-2 にこれらの観測点の地盤モデルを示す。港湾観測点の動的変形特性については、平均粒径によって土質を細分化でき拘束圧依存性も考慮できることから、安田・山口の関係¹¹⁾を用いる。

図-2~8 に、SHAKE, FDEL (C=0.65, p=1.0 の条件)、以下改良 FDEL と本論文で称する C=0.80, p=0.5 の条件、DYNEQ (f_e=6Hz) の各種の等価線形解析による伝達関数と観測記録のスペクトル比の比較を示す。

関電技研では、3Hz 付近以上では観測値に比べて、SHAKE は落ち、FDEL, DYNEQ は過大になる。小名浜港は順応答では手法による差は小さくいずれも観測値の方が非線形化しているが、逆応答では手法による差が見られ、SHAKE では過小、FDEL は過大であり、一次のピークも SHAKE, DYNEQ は低くなり過ぎ FDEL では高過ぎる。同様の傾向は釧路港の 3 地震でも見られる。地震による差異については、観測記録や周囲の状況から明瞭に液状化したと考えられている 1993 年釧路沖地震では他の地震に比べて、5Hz 付近で明瞭な谷があり 10Hz 以上で逆に大きくなっている。これは、液状化に起因し、サイク

リックモービリティによる高周波パルスの生成が影響しているが、当然ながら等価線形解析ではそのような挙動は表現できない。非線形化の度合いが小さい仙台港、八戸港では手法による差は必然的に小さい。また、いずれの地点も逆応答の場合に手法による差が大きくなっており、最初に述べたように、逐次型非線形解析等の代案もない逆応答問題において特に適切な評価法が必要となることが分かる。

表-2(c) 釧路港の地盤モデル

No.	土質	層厚 (深度) (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)
1	砂	2.0(0.)	1.80	120
2	砂	7.0(2.0)	1.80	140
3	砂	14.0(9.0)	1.95	300
4	シルト	9.0(23.0)	1.90	240
5	砂	4.0(32.0)	1.95	320
6	シルト	8.0(36.0)	1.90	250
7	砂	8.0(44.0)	2.00	300
8	砂	25.45(52.0)	2.00	330
9	砂	(77.45)	2.00	330

表-2(d) 仙台港の地盤モデル

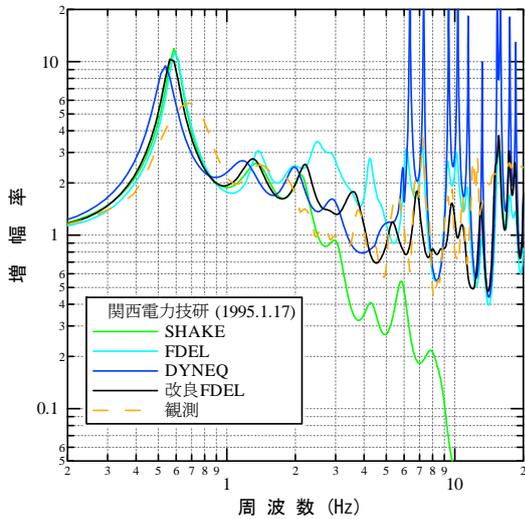
No.	土質	層厚 (深度) (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)
1	礫	3.0(0.)	1.75	180
2	砂	4.0(3.0)	1.85	250
3	岩盤	1.7(7.0)	2.40	820
4	岩盤	(8.7)	2.40	820

表-2(e) 八戸港の地盤モデル

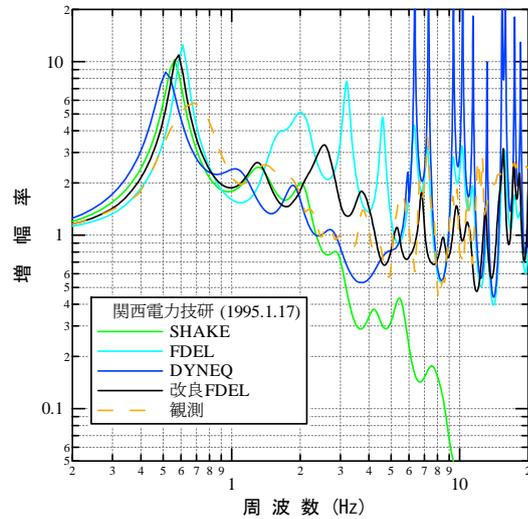
No.	土質	層厚 (深度) (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)
1	埋土 (砂)	2.0(0.)	1.90	150
2	砂	2.0(2.0)	2.11	160
3	砂質土	5.0(4.0)	2.18	180
4	シルト	3.0(9.0)	1.73	240
5	砂	6.2(12.0)	1.73	340
6	砂	(18.2)	1.73	340

表-2(f) 小名浜港の地盤モデル

No.	土質	層厚 (深度) (m)	密度 (t/m ³)	V _s (m/s)
1	埋土・盛土	2.0(0.)	1.80	120
2	砂	2.0(2.0)	1.80	150
3	砂	3.0(4.0)	1.90	200
4	シルト	4.05(7.0)	2.00	320
5	シルト	(11.05)	2.00	320

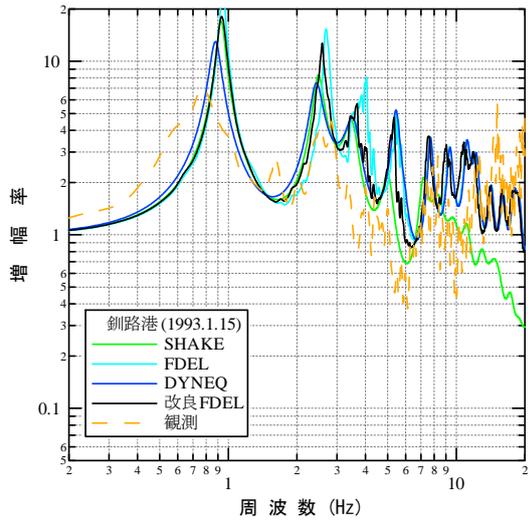


(a) 順応答解析

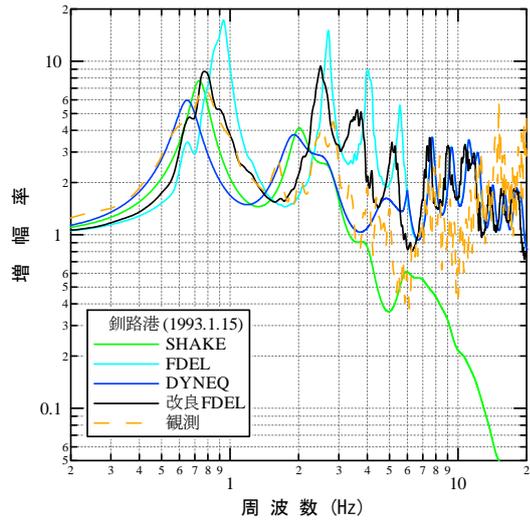


(b) 逆応答解析

図-2 伝達関数の比較 (関電技研, 1995年兵庫県南部地震 EW成分)

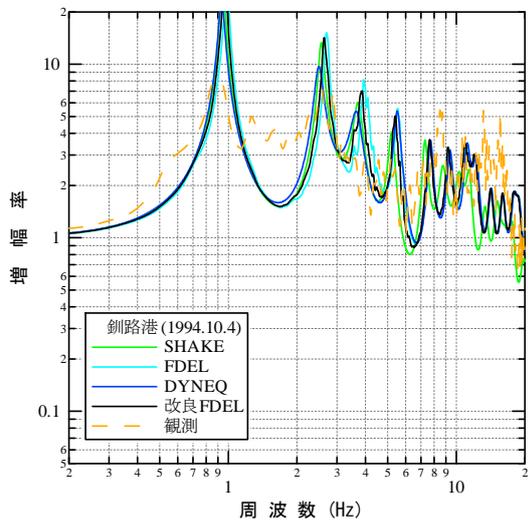


(a) 順応答解析

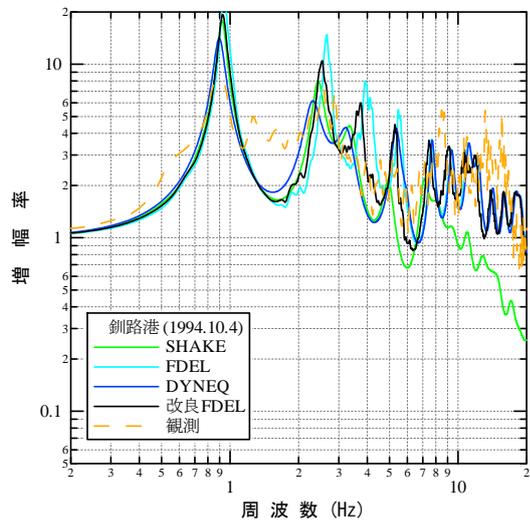


(b) 逆応答解析

図-3 伝達関数の比較 (鈮路港, 1993年鈮路沖地震 NS成分)

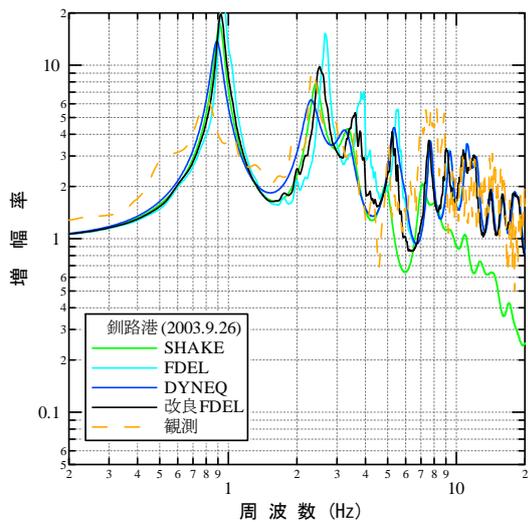


(a) 順応答解析

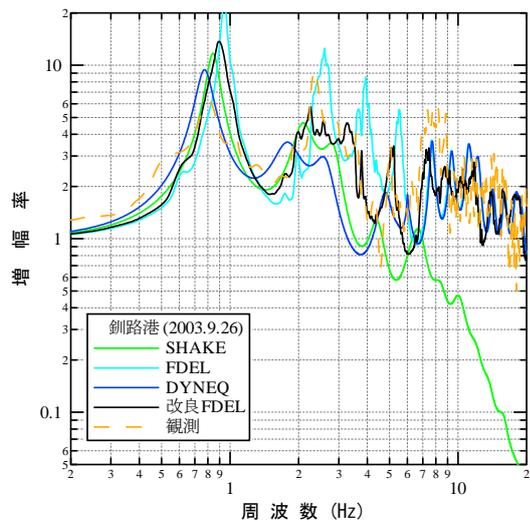


(b) 逆応答解析

図-4 伝達関数の比較 (鈮路港, 1994年北海道東方沖地震 NS成分)

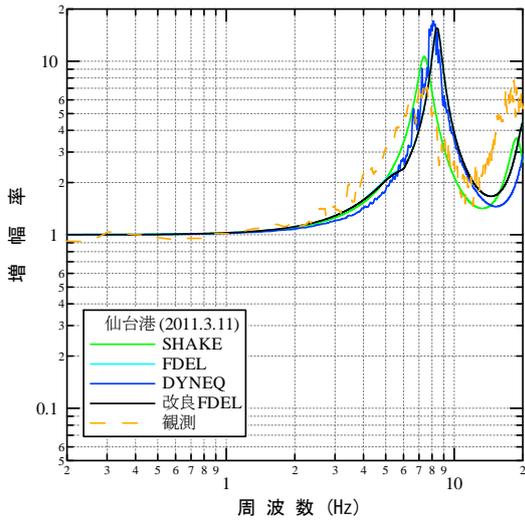


(a) 順応答解析

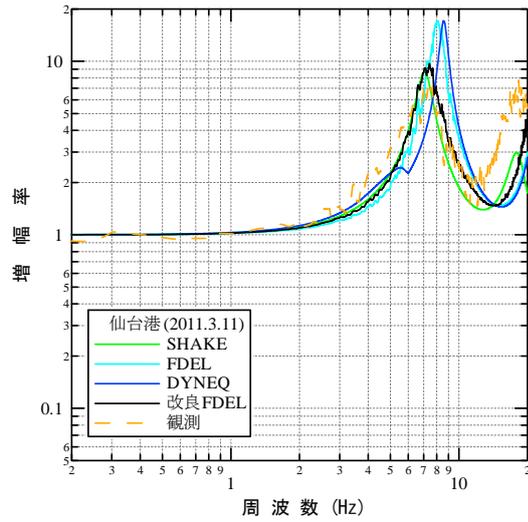


(b) 逆応答解析

図-5 伝達関数の比較 (鈮路港, 2003年十勝沖地震 EW成分)

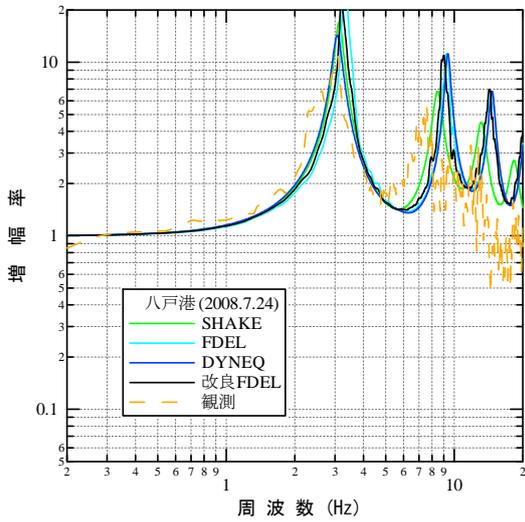


(a)順応答解析

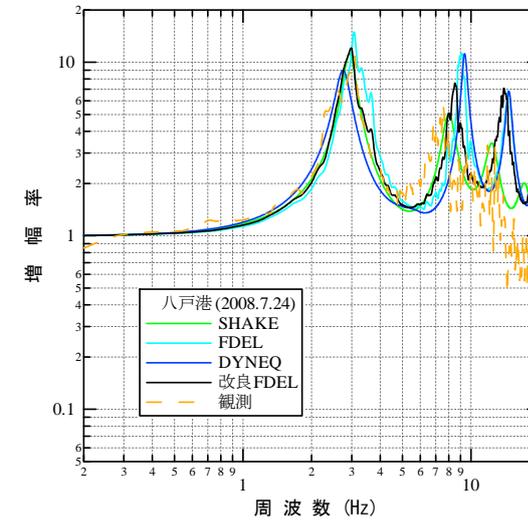


(b)逆応答解析

図-6 伝達関数の比較 (仙台港, 2011年東北地方太平洋沖地震 NS成分)

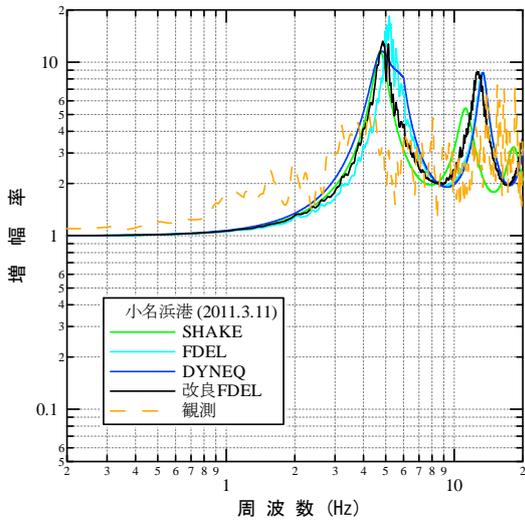


(a)順応答解析

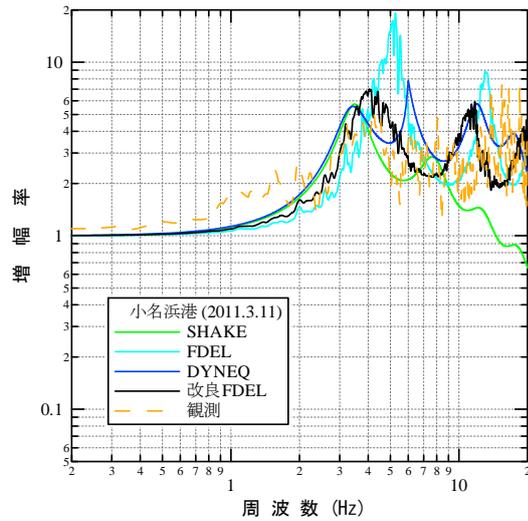


(b)逆応答解析

図-7 伝達関数の比較 (八戸港, 2008年岩手県沿岸部の地震 NS成分)



(a)順応答解析



(b)逆応答解析

図-8 伝達関数の比較 (小名浜港, 2011年東北地方太平洋沖地震 EW成分)

3.2 パラメータスタディ

手法の差が明瞭で、特にDYNEQでは高振動数成分を過大に評価している、関電技研、釧路港（1993年釧路沖地震）、八戸港の3記録について、パラメータの最適化について検討する。

高振動数で完全に弾性にしてしまうと、FDELと同じように、高振動数成分を過大評価し、実務には耐えなくなることが生じる。FDELの場合、減衰の下限值（本論文では2%に固定）を大き目に設定することで実務的に避ける措置をしているが、やや合理性に欠ける。DYNEQでは、式(4)を用いる対処法をマニュアルで示している⁶⁾。

$$\begin{cases} \gamma_{eff} = \gamma_{max} & f_p > f \\ \gamma_{eff} = \gamma_{max} \left\{ 1 - \left(1 - \frac{\gamma_{eff0}}{\gamma_{max}} \right) \left(\frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p \leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} = \gamma_{eff0} e^{-\beta(f-f_e)} & f > f_e \end{cases} \quad (4)$$

従来の式は $\gamma_{eff0}=0$ に該当する。この補正では指数的に減少し、0とはならない。 γ_{eff0} は0.01~0.1%、 β は0~0.5程度としている。

それぞれの観測点の地中観測記録を入力地震動として、 f_e 、 β を変更して地震応答解析を行った。図-9~11にそれぞれの解析による伝達関数と観測記録のスペクトル比の比較を示す。なお、 γ_{eff0} は上記の幅では値による差がほとんど見られなかったため、0.05で固定して比較している。

関電技研では、 $f_e=2\text{Hz}$ 、 $\beta=0.4$ 、釧路港（1993年釧路沖地震）では、 $f_e=3\text{Hz}$ 、 $\beta=0.3$ が順応答と逆応答の双方でのバランスがよい。八戸港では、 $f_e=8\text{Hz}$ 、 $\beta=0.1$ が比較的観測に近くなる。このように、最適なパラメータが観測点によって異なるが、地震観測データの少ない地点に適用するためには、一律または地盤情報から設定できる必要がある。 f_e については、地盤の卓越周期と関連していると考えられ、概ね線形条件での伝達関数の二次の固有振動数を目安にすることで、設定できると考えられる。 β については、中間の0.3を目安とし、0.1ほど軟弱地盤で大きく、硬質地盤で小さく調整することで適用できると考えられる。

近年では極めて大きな地震観測事例も増え、またレベル2地震動も大きなものが考えられるようになってきているので、より強い非線形挙動への適用性を確認するため、ポートアイランド（1995年兵庫県南部地震）での神戸市による観測記録を対象として、上記の検討に基づき、 $f_e=2\text{Hz}$ 、 $\beta=0.4$ とした改良DYNEQも含めて、各種の方法で地震応答解析を行う。得られた伝達関数の比較を図-12に示す。高振動数域でSHAKEが過小、FDEL、DYNEQが過大となるのは、他の観測点と同様である。観測値は、改良FDELと改良DYNEQの中間程度である。等価線形解析では液状化現象を表現できないが、動的変形特性には液状化の影響は加味されているので、改良

FDEL、改良DYNEQでは、大振幅の地震動においても地震動増幅特性を概ね考慮できると考えられる。

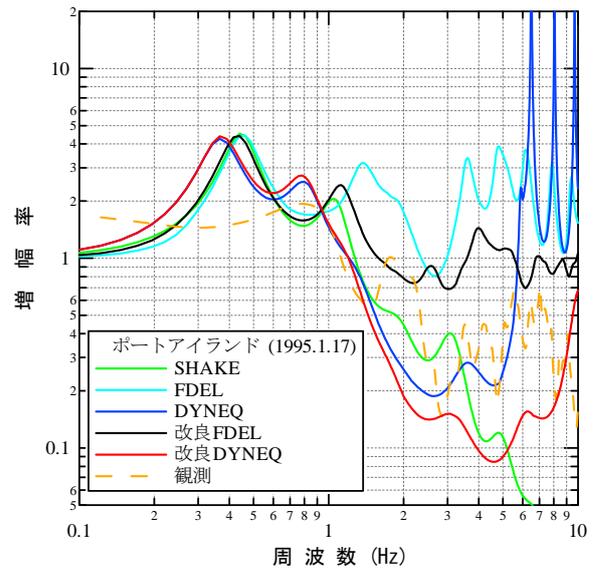
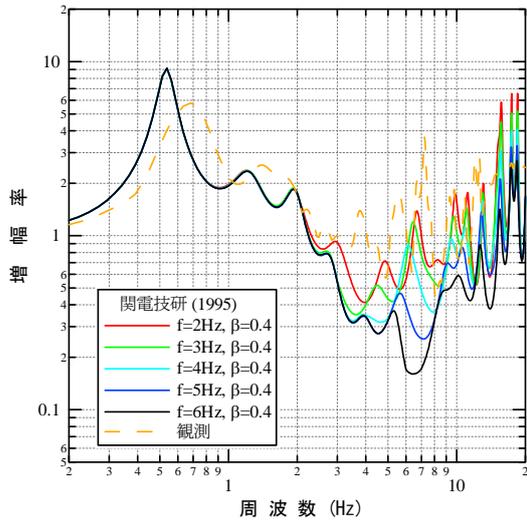


図-12 伝達関数の比較（ポートアイランド、1995年兵庫県南部地震 NS 成分）

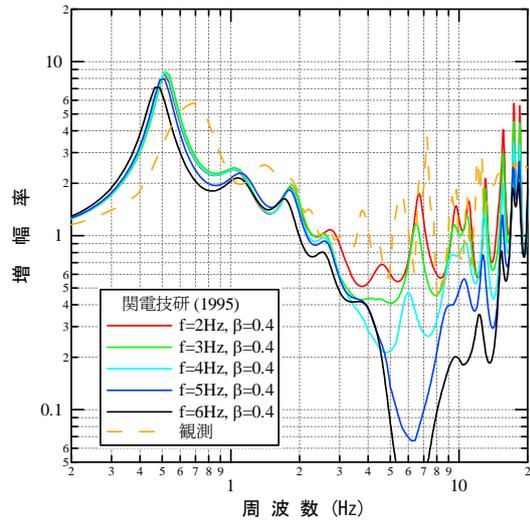
3.3 考察

関電技研と釧路港（1993年釧路沖地震）における最大加速度等の鉛直分布の比較を図-13と14に、関電技研における加速度波形の比較を図-15に示す。最大加速度分布では手法による差が大きいですが、相対変位や最大せん断ひずみでは差は小さい。これまで述べたように、改良手法は高振動数成分を改善するものであり、観測記録の再現性を高めるためには一次の卓越周期付近が重要で、そのためには地盤物性の初期値や動的変形特性が重要となる。ひずみの発生は、上下の層のインピーダンス比に大きく依存するので、単に地盤の基本固有周期が合えばよいものではないことが実用では難しい点である。加速度波形でも、改良FDEL、改良DYNEQでは順応答、逆応答とも観測波と著しく異なるものとはなっていない。FDEL、DYNEQは順応答計算において、ピーク加速度を過大評価している。また、逆応答において、SHAKEはあまりにも過大となったので図示していない。

関電技研で大きなひずみが生じている深さ6m付近の層における、地盤材料の周波数依存性の比較を図-16に示す。元々のFDEL、DYNEQでは、いずれも4~6Hzでせん断剛性と減衰定数が急激に変化するが、改良FDEL、改良DYNEQでは緩やかに変化している。本論文で議論している地盤材料の周波数依存性は、本来的に有するものでなく、等価線形解析で表せない経時変化をある程度表現するための便宜的なものである。その意味でも改良型のように、緩やかに変化する方が、順応答、逆応答の双方に対して安定した解析結果をもたらすものと考えられる。

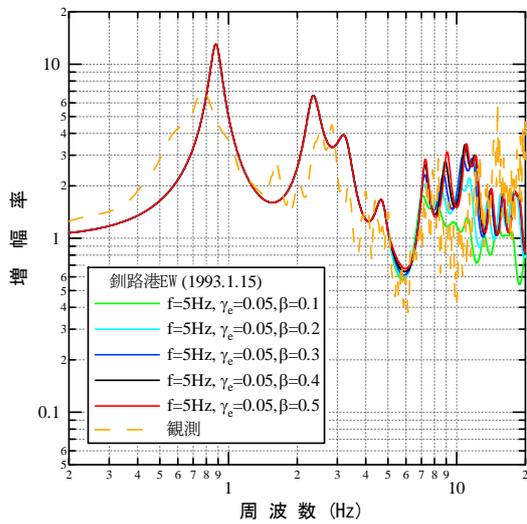


(a)順応答解析

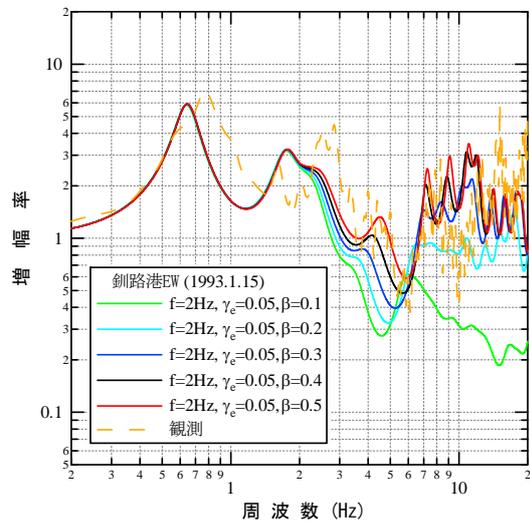


(b)逆応答解析

図-9 DYNEQのパラメータの比較 (関電技研, 1995年兵庫県南部地震EW成分)

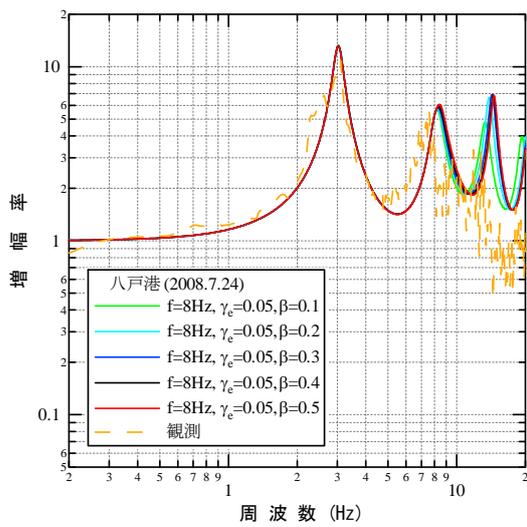


(a)順応答解析

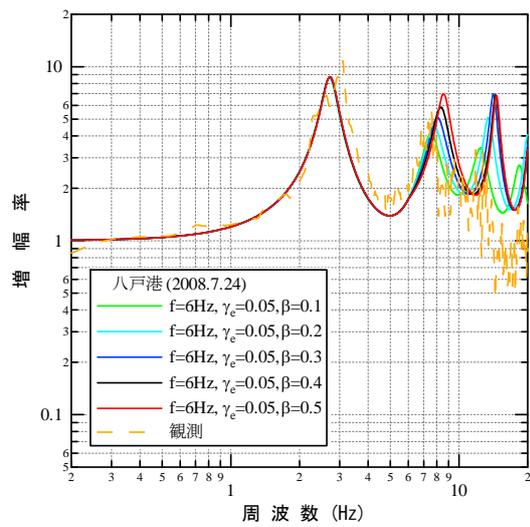


(b)逆応答解析

図-10 DYNEQのパラメータの比較 (釧路港, 1993年釧路沖地震NS成分)

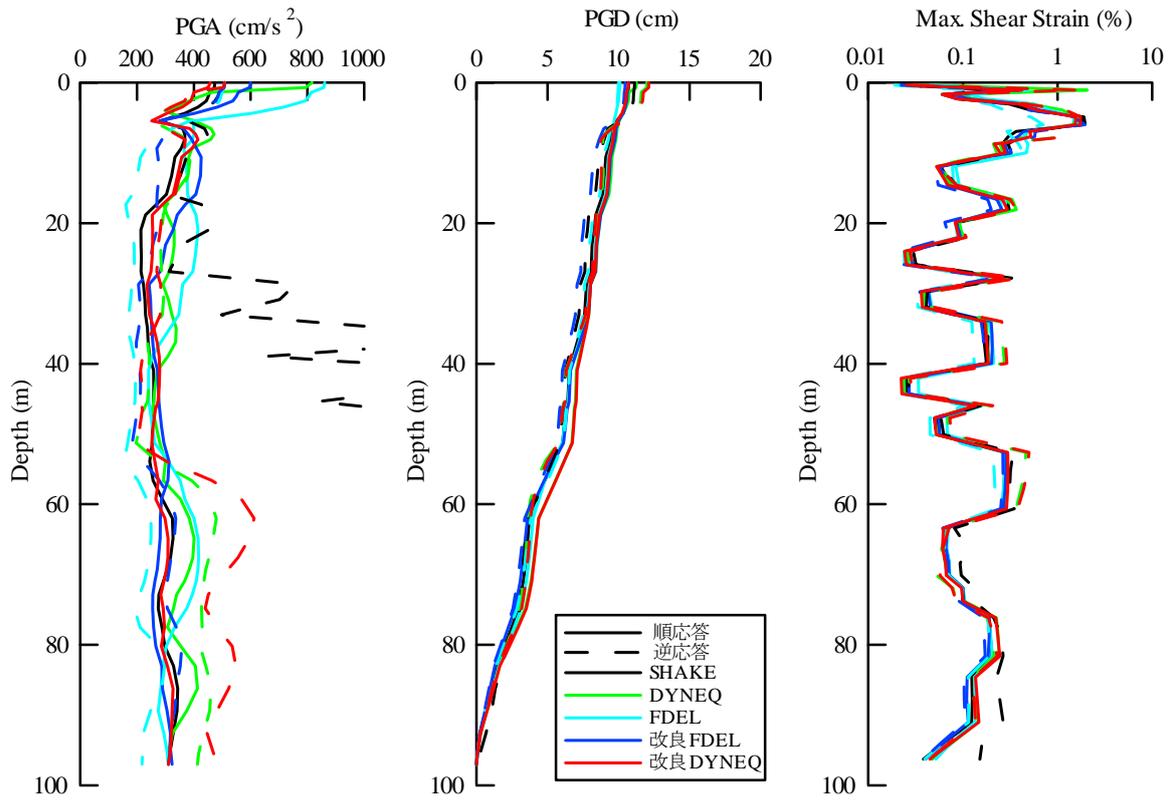


(a)順応答解析



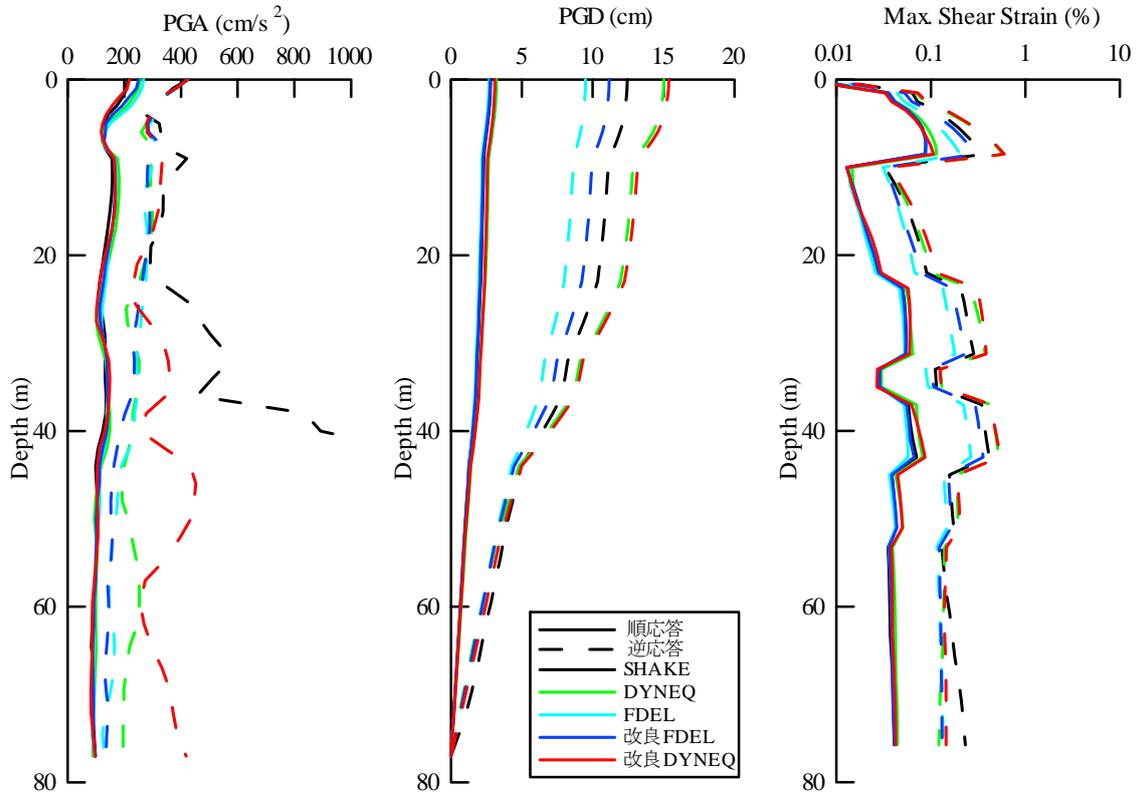
(b)逆応答解析

図-11 DYNEQのパラメータの比較 (八戸港, 2008年岩手県沿岸部の地震NS成分)



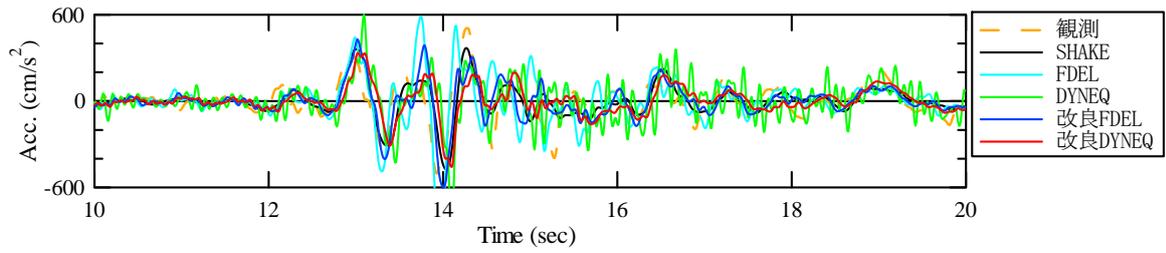
(a)最大加速度 (b)最大相対変位 (c)最大せん断ひずみ

図-13 各種等価線形解析による最大加速度等の鉛直分布の比較 (関電技研)

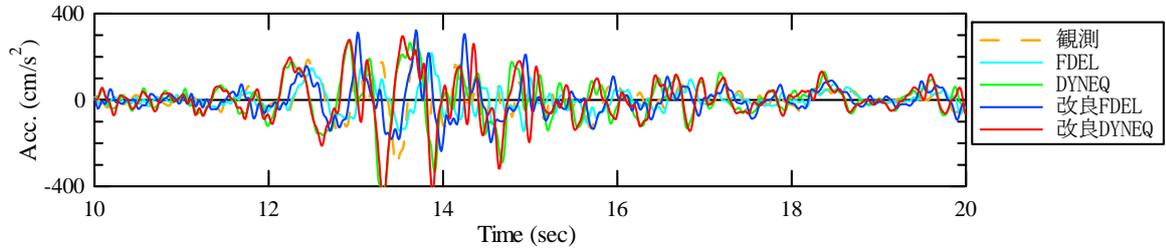


(a)最大加速度 (b)最大相対変位 (c)最大せん断ひずみ

図-14 各種等価線形解析による最大加速度等の鉛直分布の比較 (釧路港, 1993年釧路沖地震)

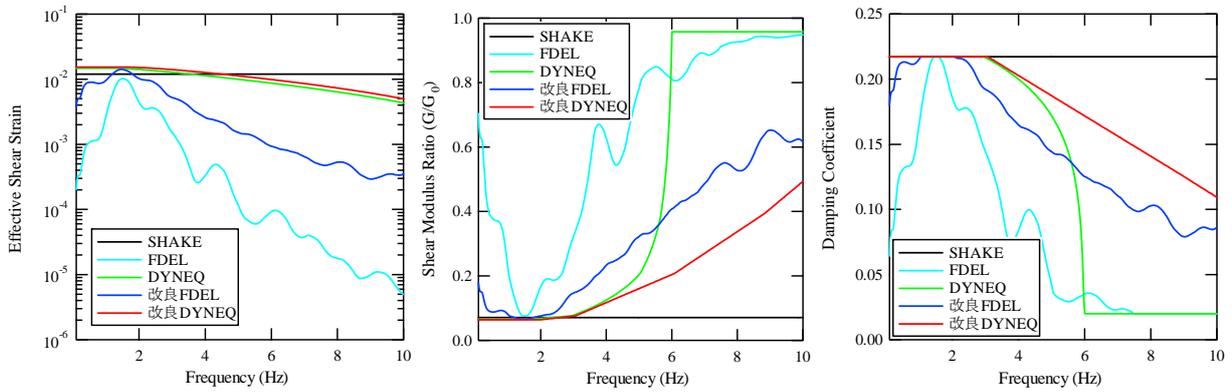


(a) 順応答計算による地表加速度波形



(b) 逆応答計算による地中加速度波形

図-15 各種等価線形解析による加速度波形の比較 (関電技研)



(a) 有効せん断ひずみ

(b) せん断剛性比

(c) 減衰定数

図-16 各種等価線形解析による地盤材料の周波数依存性の比較 (関電技研, 深さ 6m 付近)

4. まとめ

以上の検討により、高振動数域で弾性に近いせん断剛性・減衰定数を与える元々の FDEL, DYNEQ では、高振動数成分の増幅を過大に評価する可能性があることを示した。そのための対処法として、それぞれパラメータを追加して、地盤定数の疑似的な周波数依存性の変化を緩やかにしたせん断剛性・減衰定数を与えることで順応答・逆応答のいずれでも安定した結果が得られることを示した。ただし、DYNEQ については、サイトや順応答か逆応答かによって最適なパラメータの値の幅が大きい。より詳細な検討をするためには、地盤の初期モデルの精度を高める必要がある。鉛直アレー観測記録では、弱震記録の平均スペクトル比に対して最適化を行うことがしばしば行われるが、その値で強震時にも適切な値となっている保証はない。減衰についても散乱減衰等による周波数依存性を適切に表現することも必要である。今後、それらも踏まえ、より適切な関数形の検討も含め、検証を積み重ねる予定である。

本論文では、神戸市、関西電力(株)、港湾地域強震観測による地震観測データを使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) 吉田望：実用プログラム SHAKE の適用性，軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 14-31, 1994.
- 3) 杉戸真太，会田尚義，増田民夫：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，土木学会論文集，No.493/III-27，pp.49-58, 1994.
- 4) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K.: Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.22, pp.205-222, 2002.
- 5) Suetomi, I. and N.Yoshida: Damping characteristics of soil deposits during strong ground motions, *Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama*, pp.765-772, 1998.
- 6) 吉田望：DYNEQ(V3.35), <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/computercodes/index.html>, 2010.
- 7) 山本明夫，笹谷努：2003 年十勝沖地震における地盤の非線形応答：KiK-net 鉛直アレー記録の活用，日本地震工学会論文集，第 7 卷，第 2 号（特集号），pp.144-159, 2007.
- 8) 吉田望：1995 年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析，土と基礎，Vol. 43, No. 10, pp. 49-54, 1995.
- 9) 関西地震観測研究協議会：関西の地震記録，2003
- 10) 港湾地域強震観測 web サイト：
<http://www.mlit.go.jp/kowan/kyosin/eq.htm>
- 11) 安田進，山口勇：種々の不攪乱土における動的変形特性，第 20 回土質工学研究発表会講演集，pp.539-542, 1985.

A PARAMETRIC-STUDY OF EQUIVALENT LINEAR METHOD CONSIDERING FREQUENCY DEPENDENT CHARACTERISTICS OF SOIL DEPOSITS

Iwao SUETOMI and Nozomu YOSHIDA

Ideal frequency dependent shear modulus and damping ratio characteristics are proposed through the analyses of vertical array several strong motion records by the parametric study. At first, FDEL and DYNEQ, equivalent linear methods developed to improve the disadvantage of SHAKE by considering frequency dependency of material property, are examined and are shown to overestimate amplification at high frequency range. Then frequency dependent functional shape is examined by optimizing the response. It is concluded that small amount of damping is necessary to suppress overestimation of amplification at high frequency, which corresponds scattering attenuation due to inhomogeneity of the ground. It is also pointed out that functional shape is better to be smooth. Optimized parameters give good result for both convolution and deconvolution analyses.